

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA
E PROPRIEDADE INTELECTUAL

Wellerson da Silva Bastos

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS UNIVERSAL
PARA MONITORAMENTO DE BARRAGENS, COM TESTE DE EQUALIZAÇÃO DE
PIEZÔMETROS, UTILIZANDO INTERNET DAS COISAS

Belo Horizonte

2024

Wellerson da Silva Bastos

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS
UNIVERSAL PARA MONITORAMENTO DE BARRAGENS, COM TESTE DE
EQUALIZAÇÃO DE PIEZÔMETROS, UTILIZANDO INTERNET DAS COISAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual.

Área de Concentração: Inovação Tecnológica.
Linha de Pesquisa: Desenvolvimento de soluções de Internet das Coisas para resolução de problemas interdisciplinares.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Borges da Cunha
Coorientador: Me. Alexandre Vaz de Melo

Belo Horizonte

2024

043

Bastos, Wellerson da Silva.

Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados universal para monitoramento de barragens, com teste de equalização de piezômetros, utilizando internet das coisas [manuscrito] / Wellerson da Silva Bastos. – 2023. 198 f.: il. ; 29,5 cm.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Borges da Cunha. Coorientador: Me. Alexandre Vaz de Melo.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas. Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual.

1. Inovação. 2. Barragens. 3. Monitoramento. 4. Internet das Coisas. I. Cunha, Adriano Borges da. II. Melo, Alexandre Vaz de. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Biológicas. IV. Título.

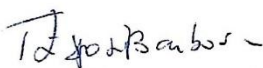
CDU: 608.5

**“DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS
UNIVERSAL PARA MONITORAMENTO DE BARRAGENS, COM
TESTE DE EQUALIZAÇÃO DE PIEZÔMETROS, UTILIZANDO
INTERNET DAS COISAS”**

WELLERSON DA SILVA BASTOS

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia 07 de julho de 2023, pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes membros:


MESTRE ALEXANDRE VAZ DE MELO
CEMIG


PROFA. DRA. TEREZINHA DE JESUS ESPÓSITO BARBOSA
ESCOLA DE ENGENHARIA/UFMG


PROF. DR. LUCAS VINICIUS RIBEIRO ALVES
COLTEC/UFMG


PROF. DR. ADRIANO BORGES DA CUNHA – ORIENTADOR
COLTEC/UFMG

Instituto de Ciências Biológicas – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Belo Horizonte, 07 de julho de 2023



Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Biológicas
Departamento de Fisiologia e Biofísica
Mestrado Profissional Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus que me concedeu a vida e o discernimento necessário para executar este trabalho.

Sou grato aos meus pais Daniela Soares e Fidelis José, cujo amor, apoio e encorajamento incondicionais foram fundamentais para meu progresso até aqui.

Um agradecimento especial à minha amada esposa que esteve ao meu lado constantemente, dedicando-se incansavelmente em cada minuto, finais de semana e noites sem dormir, para concluirmos este trabalho juntos. Te amo, meu amor!

Expresso minha profunda gratidão ao Professor Adriano, meu orientador, que acreditou em mim e no nosso projeto, depositando plena confiança em meu potencial. Sua orientação, apoio e amizade foram inestimáveis para o sucesso desta pesquisa. Desejo que você continue sendo este ser humano fantástico e inigualável em sua bondade e caráter. Sem você, Professor, nada disso teria sido possível.

Quero estender um agradecimento especial ao meu mentor, professor, eterno chefe e grande amigo, Alexandre Vaz de Melo. Agradeço os sermões, revisões criteriosas de documentos, conselhos preciosos e, acima de tudo, a amizade e consideração. Sua presença em minha vida foi fundamental para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Expresso minha gratidão ao Professor Alberto de Figueiredo Gontijo. Agradeço todo o apoio ao longo do projeto. Sua atenção e dedicação foram essenciais para seu desenvolvimento. Sem você, eu não teria superado os desafios ao longo do caminho.

Agradeço aos estagiários do curso de eletrônica do LITE COLTEC, formandos do segundo semestre de 2022. Em particular, agradeço a Juan Pablo que trabalhou diretamente no projeto, e ao Henrique Cauã que permaneceu conosco até o fim, mesmo sem incentivos ou obrigações. Henrique, estamos juntos. Muito obrigado por sua dedicação e apoio contínuos.

Agradeço ao meu amigo João Locke, que esteve ao meu lado desde o início desta jornada no mestrado. Seu apoio sempre que precisei foram inestimáveis. Obrigado.

Por fim, expresso minha gratidão a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho. Seu apoio, encorajamento e amizade foram essenciais nesta jornada. A todos, meu mais sincero agradecimento.

"I do not believe there is any thrill that can go through the human heart like that felt by the inventor as they see some creation of the brain unfolding to success." (Nikola Tesla)

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo principal a concepção e validação de um sistema de aquisição de dados universal para monitoramento de barragens, focado no desenvolvimento da "Placa Universal", Placa de Condicionamento de Sinais e módulo específico para a semiautomação dos testes de equalização em piezômetros do tipo *standpipe*. A proposta visa oferecer uma alternativa de baixo custo e manutenção reduzida, adequada para aplicação em estruturas localizadas em regiões remotas e de difícil acesso. Para comprovar a eficácia da solução proposta foram realizadas simulações computacionais e rigorosos testes laboratoriais, que resultaram em êxito na maioria dos casos. A metodologia adotada neste estudo foi dividida em três etapas distintas. Na primeira fase foi realizada uma revisão bibliográfica abrangendo artigos científicos e patentes relacionadas ao monitoramento automatizado de barragens e aos testes de equalização em piezômetros. A segunda fase consistiu na especificação e teste dos componentes eletrônicos, incluindo o desenvolvimento do firmware e da lógica de leitura dos sensores. Por fim, na terceira fase foram conduzidos testes laboratoriais para validar os dispositivos desenvolvidos, abrangendo a leitura e armazenamento de diferentes sensores, bem como os testes de equalização em piezômetros. Os resultados obtidos evidenciaram a efetividade das soluções propostas, tanto nas simulações computacionais quanto nos testes laboratoriais. Nos testes comparativos entre o dispositivo criado ("Placa Universal" e Placa de Condicionamento de Sinais) e um dispositivo comercial, as diferenças nas leituras foram inferiores a 1% para a frequência de leitura de um sensor de corda vibrante, e aproximadamente 5% para a medição de temperatura. No caso dos testes comparativos do módulo de equalização em piezômetros *standpipe*, as diferenças entre os cálculos manuais e os realizados pelo módulo desenvolvido foram inferiores a 10%, o que é aceitável considerando a variabilidade dos cálculos de permeabilidade. Além disto, tais resultados destacam o bom desempenho e a completa usabilidade do módulo criado.

Palavras-chave: Monitoramento de barragens, aquisição de dados, protótipo, *IoT*, equalização em piezômetros.

ABSTRACT

The present study aims at the conception and validation of a universal data acquisition system for dam monitoring, focusing on the development of the Universal Board, Signal Conditioning Board, and a specific module for the semi-automation of standpipe piezometer equalization tests. The proposal seeks to offer a low-cost and low-maintenance alternative suitable for structures located in remote and inaccessible regions. To demonstrate the effectiveness of the proposed solution, computational simulations and rigorous laboratory tests were conducted, resulting in successful outcomes in the majority of cases. The methodology adopted in this study is divided into three distinct phases. In the first phase, a literature review encompassing scientific articles and patents related to automated dam monitoring and piezometer equalization tests was performed. The second phase consisted of the specification and testing of electronic components, including the development of firmware and sensor reading logic. Finally, in the third phase, laboratory tests were conducted to validate the developed devices, involving the reading and storage of different sensors, as well as standpipe piezometer equalization tests. The results obtained demonstrated the effectiveness of the proposed solutions, both in computational simulations and laboratory tests. In comparative tests between the developed devices (Universal Board and Signal Conditioning Board) and the commercial device, the differences in readings were less than 1% for the frequency measurement of a vibrating wire sensor and approximately 5% for temperature measurement. Regarding the comparative tests of the standpipe piezometer equalization module, the differences between manual calculations and those performed by the developed module were less than 10%, which is acceptable considering the variability of permeability calculations. Furthermore, these results highlight the good performance and full usability of the created module.

Keywords: Dam monitoring, data acquisition, prototype, IoT, standpipe piezometer equalization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de monitoramento de barragens com coleta de dados manual.....	27
Figura 2 – Nível freático quando não há fluxo d’água subterrânea.....	32
Figura 3 – Nível freático e poropressão devido à sobrecarga (processo de adensamento)	33
Figura 4 – Perfil típico de instalação de piezômetro <i>Standpipe</i>	35
Figura 5 – Forma de leitura de um piezômetro <i>standpipe</i> , utilizando a sonda elétrica “piu”. .	36
Figura 6 – Seção transversal hipotética instrumentada	37
Figura 7 – Piezômetro de corda vibrante e seus componentes	40
Figura 8 – Croqui de exemplo de piezômetro de corda vibrante instalado diretamente em aterro	40
Figura 9 – Croqui de instalação de um piezômetro elétrico de corda vibrante	42
Figura 10 – Modelo simplificado sensor de corda vibrante	43
Figura 11 – Diagrama Geral do dispositivo destinado a ler instrumentos de corda vibrante patenteados em 1975	45
Figura 12 – Esquemáticos dos circuitos de excitação proposto por Viman <i>et al.</i> (2004)	47
Figura 13 – Diagrama em Blocos	48
Figura 14 – Diagrama de blocos.....	48
Figura 15 – Gráfico representando os sinais de excitação e o sinal subamortecido devolvido pelo sensor	49
Figura 16 – Diagrama de blocos.....	50
Figura 17 – Diagrama de blocos dos dispositivos para ler sensores de corda vibrante e conexões remotas	51
Figura 18 – Componentes do dispositivo desenvolvido por Sattler <i>et al.</i> (2020)	53
Figura 19 – Imagem representando os componentes utilizados nos testes feitos por Sattler <i>et al.</i> (2020) - Câmara de pressão, unidade de leitura comercial e registrador de dados de baixo custo que foi elaborado	54
Figura 20 – Comparação entre as leituras do dispositivo desenvolvido por Sattler <i>et al.</i> (2020) e um dispositivo comercial destinado a fazer as mesmas leituras	54
Figura 21 – Representação dos parâmetros utilizados no ensaio de dissipação	56
Figura 22 – Representação das tensões em um bulbo drenante de um piezômetro instalado em aterro compactado.....	57
Figura 23 – Quatro camadas da arquitetura IoT	64
Figura 24 – Exemplo de topologia de comunicação IoT.....	65

Figura 25 – Cinco Camadas IoT Cisco.....	67
Figura 26 – Arquitetura de rede do protocolo MQTT apresentado por Soni e Makwana (2017)	69
Figura 27 – Arduino UNO.....	75
Figura 28 – Arduino Mega.....	75
Figura 29 – ESP8266.....	76
Figura 30 – ESP32.....	76
Figura 31– STM32F103C8T6.....	77
Figura 32 – Placa Universal – Projeto parte superior.....	81
Figura 33 – Projeto Placa Universal parte inferior.....	81
Figura 34 – Vista Superior 2D do projeto da Placa Universal.....	82
Figura 35 – Vista superior do protótipo da Placa Universal.....	83
Figura 36 – Diagrama em Blocos da Placa de condicionamento de Sinais.....	85
Figura 37 – Sinal devolvido por um piezômetro de corda vibrante modelo 4500C da Geokon, medido e apresentado pela ferramenta de leitura VW Analiser da Campbell Scientific.....	91
Figura 38 – Componente <i>The Arbitrary Controlled Source Models</i> utilizado para simular o sinal do sensor de corda vibrante.....	92
Figura 39 – Parâmetros utilizados nos sinais de entrada do componente AVS1 com o intuito de simular o sinal gerado por um sensor de corda vibrante.....	93
Figura 40 – Sinal semelhante ao sinal de sensores de corda vibrante gerado no software de simulação Proteus 8.....	95
Figura 41 – Diagrama em bloco dos estágios 3, 4 e 5 de condicionamento de sinais.....	96
Figura 42 – Simulação do estágio 3 de condicionamento de sinal correspondente à amplificação primária.....	96
Figura 43 – Sinal da Figura 39 após passar pelo estágio 3 de condicionamento e ter seu sinal amplificado pela primeira vez.....	97
Figura 44 – Simulação do estágio 4 de condicionamento de sinal correspondente ao Filtro passa- faixa.....	98
Figura 45 – Resposta do Filtro passa-faixa no domínio da frequência simulado no Proteus 8	98
Figura 46 – Sinal similar ao do emitido pelo sensor de corda vibrante, simulado do Proteus 8, após passar pelas simulações dos estágios 3 e 4 de condicionamento.....	99
Figura 47 – Simulação do estágio 5 de condicionamento de sinal correspondente à Amplificação Final e condicionamento do sinal.....	99

Figura 48 – Sinal similar ao do emitido pelo sensor de corda vibrante, simulado do Proteus 8, após passar pelas simulações dos estágios 3, 4 e 5 de condicionamento de sinal	100
Figura 49 – Simulação do estágio 5 de condicionamento de sinal correspondente à Amplificação Final e condicionamento do sinal	101
Figura 50 – Sinal resultante depois de passar por todos os estágios de condicionamento	101
Figura 51 – Simulação conceitual do circuito de excitação da placa de condicionamento de sinais para ler sensores de corda vibrante permitindo a passagem do sinal de excitação	103
Figura 52 – Sinal de saída do buffer, idêntico ao de entrada que tem o intuito de simular o sinal que será gerado pelo ESP32 para excitar o sensor	103
Figura 53 – Simulação conceitual do circuito de excitação da placa de condicionamento de sinais para ler sensores de corda vibrante não permitindo a passagem do sinal de excitação	103
Figura 54 – Sinal de saída do buffer cortado pelo bit de controle.....	104
Figura 55 – Simulação da Etapa 2 de condicionamento da Placa de condicionamento de sinais com o bit de controle em 1(um) permitindo a passagem do sinal	105
Figura 56 – Sinal na saída de chave analógica da simulação da etapa 2 de condicionamento	105
Figura 57 – Simulação da Etapa 2 de condicionamento da Placa de condicionamento de sinais com o bit de controle em 0 (zero) não permitindo a passagem do sinal com bit de controle em 1 (um)	106
Figura 58 – Sinal na saída de chave analógica da simulação da etapa 2 de condicionamento com bit de controle em 0 (zero).....	106
Figura 59 – Simulação do estágio 1 de condicionamento utilizando o CI 74HC245.....	113
Figura 60 – Resultados da simulação do estágio 1 de condicionamento utilizando o CI 74HC245	113
Figura 61 – Simulação do estágio 3 de condicionamento utilizando o amplificador de instrumentação AD620	114
Figura 62 – Sinais de entrada e de saída, respectivamente, da simulação do estágio 3 de condicionamento de sinais utilizando AD620	114
Figura 63 – Simulação do estágio 4 de condicionamento utilizando o amplificado operacional OP07	115
Figura 64 – Resultado da simulação do estágio 4 de condicionamento utilizando o amplificado operacional OP07	115
Figura 65 – Gráfico de resposta do Filtro passa-faixa utilizando OP07 no dominio da frequência	116

Figura 66 – Simulação do estágio 5 de condicionamento de sinais utilizando o amplificador operacional OP07	117
Figura 67 – Resultado da simulação do estágio 5 de condicionamento utilizando o amplificador operacional OP07	117
Figura 68 – Setup montado para testar o estágio 1 e 3 e a interação entre esses circuitos.....	119
Figura 69 – Montagem e resultados dos testes do estágio 1 e 3 de condicionamento e a interação entre eles.....	121
Figura 70 – Montagem para testar o estágio 2 - chaveamento de sinais composto pelo AD620	122
Figura 71 – Sinal de entrada e saída 4066 fechada	122
Figura 72 – Sinal de entrada e saída 4066 aberta	123
Figura 73 – Montagem para teste de validação do estágio 4 filtro passa-faixa.....	123
Figura 74 – Resultado da validação dos estágios 4, 5 e 6	124
Figura 75 – Montagem do circuito para validação dos estágios 3, 4, 5 e 6 de condicionamento de sinais	125
Figura 76 – Resultado do teste de validação em bancada dos estágios 3, 4, 5 e 6 da placa de condicionamento de sinais.....	125
Figura 77 – Montagem para validação da leitura dos termistores dos sensores de corda vibrante pelo ESP32	126
Figura 78 – Dados lidos pelo ESP32 do termistor embutido em um piezômetro de corda vibrante modelo 4500C	127
Figura 79 – Representação do conversor DC/DC disponível no LITE	128
Figura 80 – Montagem para validação do conversor DC/DC para gerar tensão negativa	129
Figura 81 – Vista superior do projeto da primeira Placa de Condicionamento de Sinais	130
Figura 82 – Vista Superior do primeiro protótipo da Placa de Condicionamentos de Sinais	130
Figura 83 – Vista inferior do primeiro protótipo da Placa de Condicionamento de Sinais....	130
Figura 84 – Montagem para testes primários no primeiro protótipo de Placa de Condicionamento de sinais.....	131
Figura 85 – Projeto do segundo protótipo da Placa de Condicionamento de sinais 2.0.....	133
Figura 86 – Vista superior da versão 2.0 do protótipo de Placa de Condicionamento de sinais	134
Figura 87 – Montagem para testes primários no segundo protótipo de Placa de Condicionamento de sinais.....	135

Figura 88 – Resultado do teste primário de validação da Placa de Condicionamento versão 2.0	135
Figura 89 – Fluxograma de Firmware desenvolvido.....	141
Figura 90 – Tela de Configuração do NodeRed para apontar o Servidor MQTT que receberá os dados	145
Figura 91 – Representação gráfica do nó criado no software Node-Red para receber os dados via MQTT.....	146
Figura 92 – Tela de edição do nó criado no software Node-Red para receber os dados via MQTT	147
Figura 93 – Tela de configuração do TLS no software NodeRed.....	148
Figura 94 – Tela de Configuração da aparência do indicador gráfico do software NodeRed que vai apresentar os dados recebidos via MQTT	149
Figura 95 – Tela de Configuração da aparência do Gráfico do software NodeRed que vai apresentar os dados recebidos via MQTT	150
Figura 96 – Tela de apresentação das leituras do sensor de corda vibrante transmitidos via MQTT para o broker e apresentados na tela do software Node-Red	151
Figura 97 – Tela inicial do software do módulo do teste de equalização em piezômetro do tipo <i>standpipe</i>	154
Figura 98 – Tela do módulo de teste de equalização em piezômetro.....	155
Figura 99 – Tela indicando que o teste de dissipação está sendo realizado	156
Figura 100 – Vista da Placa Universal alimentada com banco de baterias com 4 células	158
Figura 101 – Placa Universal sendo alimentada com 12Vcc com fonte de tensão controlada	159
Figura 102 – Placa Universal sendo alimentada com 12Vcc com fonte de tensão controlada	159
Figura 103 – Módulo conversor 4 a 20mA.....	160
Figura 104 – Sonda de nível Velki saída de 4 a 20mA	161
Figura 105 – Gabarito montado para realização do teste de leitura de um sensor de pressão que varia corrente de 4 a 20mA.....	161
Figura 106 – Detalhe da ligação feita entre a Placa Universal, o módulo para leitura de corrente e o transdutor de pressão que varia corrente elétrica (4 a 20mA)	162
Figura 107 – Piezômetro de corda vibrante utilizado em todos os testes.....	164
Figura 108 – Registro do teste inicial realizado na Placa de condicionamento de sinais.....	165

Figura 109 – Sinal de resposta do sensor de corda vibrante 4500C registrado no osciloscópio por meio da Placa de Condicionamento de sinais	165
Figura 110 – Montagem de teste contendo a Placa Universal e a Placa de condicionamento de sinais fixadas em um suporte de madeira e apresentando a leitura de frequência e temperatura do piezômetro de teste 4500C da Geokon	166
Figura 111– Comparação das leituras do mesmo sensor entre o dispositivo comercial <i>VWAnaliser</i> e o sistema desenvolvido	167
Figura 112 – Croqui do piezômetro Casagrande Genérico utilizado para teste do módulo teste de equalização indicando os dados antes do ensaio ser iniciado	170
Figura 113 – Croqui do piezômetro Casagrande Genérico utilizado para teste do módulo teste de equalização indicando as cargas após a inserção da sobrecarga calculada.....	171
Figura 114 – Gráfico Teste de Equalização manual do Piezômetro Genérico	173
Figura 115 – Gráfico plotado da variação de carga do Piezômetro Genérico com os dados faltantes interpolados utilizando a biblioteca Numpy	174
Figura 116 – Tela inicial do módulo teste de equalização em piezômetros com a conexão estabelecida com a Placa Universal e fazendo as leituras para os testes de validação	175
Figura 117 – Tela do teste de equalização mostrando os dados do teste inseridos e os dados calculados pelo sistema	176
Figura 118 – Tela com de Status do teste de equalização com o teste em andamento.....	177
Figura 119 – Tela com Status do teste de equalização com o teste Finalizado	177
Figura 120 – Gráfico de resultados que é gerado pelo módulo teste de dissipação contendo o resultado dos ensaios do piezômetro Genérico.....	178
Figura 121 – Confecção do gabarito de testes elaborado para testar a solução desenvolvida	180
Figura 122 – Vista frontal do gabarito desenvolvido	181
Figura 123 – Gráfico dos dados gerados no teste de leitura utilizando o gabarito de testes para variar a carga medida pelo sensor	182
Figura 124 – Leitura 1,68 (mca) Carga para teste	182
Figura 125 – Leitura de 0,5 (mca)	183
Figura 126 – Leitura 0,22 (mca).....	183
Figura 127 – Gráfico com as variações na fase de descarga utilizando o gabarito de teste e o sistema SADUMBA para leitura e transmissão dos dados lidos do piezômetro de corda vibrante inserido no tubo do gabarito	184
Figura 128 – Vista geral da Tela de apresentação dos dados sendo acessada via Web após a autenticação do login e senha determinados	185

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais patentes nacionais e internacionais relacionadas à aquisição automática de dados de instrumentação de barragem e teste de equalização (permeabilidade).....	18
Tabela 2 – Principais patentes internacionais relacionadas à aquisição automática de dados de instrumentação de barragem e teste de equalização (permeabilidade).....	19
Tabela 3 – Exemplos de barragens de usinas hidrelétricas brasileiras que tiveram sua instrumentação automatizada nos últimos 18 anos.....	28
Tabela 4 – Resultado do primeiro teste realizado em laboratório do dispositivo desenvolvido por Zhu e Zhu (2014)	52
Tabela 5 – Métricas para escolha do Microcontrolador	73
Tabela 6 – Lista de características dos embarcados com base nas métricas estipuladas.....	77
Tabela 7 – Comparação entre os conversores analógicos digitais dos embarcados.....	78
Tabela 8 – Faixa de frequência de trabalho dos sensores elétricos de corda vibrante de diversas marcas.....	86
Tabela 9 – Tabela Verdade do CI 74HC245	112
Tabela 10 – Tabela de dados do teste de validação da Placa Universal fazendo a leitura de um sensor piezôresistivo.....	163
Tabela 11 – Dados do teste de comparação de leitura.....	168
Tabela 12 – Diferenças percentuais entre as leituras realizadas com os dispositivos SADUMBA e <i>VWAnalyser</i>	168
Tabela 13 – Tabela de dados do ensaio de equalização do piezômetro genérico feito manualmente.....	172

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CBDB	Comitê Brasileiro De Barragens
CI	Circuito Integrado
F	Fator de Forma
H_0	Carga piezométrica inicial antes do ensaio
ICOLD	International Commission on Large Dams
IoT	Internet das coisas
K	Coefficiente de permeabilidade
K_0	Coefficiente de empuxo em repouso
Lb	Altura do bulbo drenante piezômetro
Li	Leitura Inicial do comprimento do tubo vazio do piezômetro
SADUMBA	Sistema de Aquisição de Dados Universal para Monitoramento de barragens
T	Tempo de Retardo básico
M	Metro
σ_c	Tensão crítica
σ_h	Tensão total horizontal
σ_v	Tensão total vertical
σ'_v	Tensão efetiva vertical
σ'_h	Tensão efetiva horizontal
γ_n	Peso específico do solo natural
Lb	Altura do bulbo drenante piezômetro
γ_w	Peso específico da água
γ_{sat}	Densidade do solo saturado
ΔH_c	Acréscimo de carga crítico
ΔH_0	Acréscimo de carga para realização do ensaio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
	1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E RELEVÂNCIA	17
	1.2 MOTIVAÇÃO	21
	1.3 OBJETIVOS	22
	1.4 METODOLOGIA	22
	1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	24
2	REFERENCIAL TEÓRICO E ESTADO DA ARTE	26
	2.1 VISÃO GERAL DA INSTRUMENTAÇÃO DE MONITORAMENTO DE BARRAGENS	26
	2.2 AUTOMATIZAÇÃO DE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS NO BRASIL	27
	2.3 PIEZÔMETROS	29
	2.3.1 Nível freático	31
	2.3.2 Poropressão	32
	2.3.3 Subpressão	33
	2.3.4 Tipos de Piezômetros	34
	2.3.5 Automação de piezômetros do tipo standpipe (tubo aberto)	41
	2.4 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS PARA LEITURA DE SENSORES DE CORDA VIBRANTE	43
	2.5 TESTE DE EQUALIZAÇÃO EM PIEZÔMETROS <i>STANDPIPE</i> (TUBO ABERTO)	55
	2.6 INTERNET DAS COISAS	63
3	DESENVOLVIMENTO DOS DISPOSITIVOS DO SISTEMA	71
	3.1 DESENVOLVIMENTO DA PLACA UNIVERSAL	71
	3.1.1 Considerações iniciais	71
	3.1.2 Metodologia para o desenvolvimento	71
	3.2 DESENVOLVIMENTO DA PLACA DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS PARA SENSORES DE CORDA VIBRANTE	84
	3.2.1 Considerações iniciais	84
	3.2.2 Metodologia do desenvolvimento	84

3.3	DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE DA PLACA UNIVERSAL PARA LEITURA DO SENSOR DE CORDA VIBRANTE E TRANSMISSÃO AUTOMÁTICA DOS DADOS	136
3.3.1	Metodologia do desenvolvimento	136
3.3.2	Elaboração e desenvolvimento do Firmware do sistema	137
3.4	CONFIGURAÇÃO DO SERVIDOR E DO SISTEMA DE GESTÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS UNIVERSAL PARA MONITORAMENTO DE BARRAGENS	144
4	DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO DE TESTE DE EQUALIZAÇÃO EM PIEZÔMETROS TIPO <i>STANDPIPE</i>	152
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	152
4.2	METODOLOGIA UTILIZADA PARA DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO DE TESTE DE PIEZÔMETROS	152
4.3	DESCRIÇÃO DO MÓDULO DESENVOLVIDO E DOS SEUS ELEMENTOS	153
5	TESTE EM LABORATÓRIO PARA VALIDAÇÃO DA SOLUÇÃO	157
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	157
5.2	EXPERIMENTOS DE LABORATÓRIO COM A PLACA UNIVERSAL: TESTES E RESULTADOS	157
5.3	EXPERIMENTOS DE LABORATÓRIO COM A PLACA DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS: TESTES E RESULTADOS	164
5.4	EXPERIMENTOS DE LABORATÓRIO COM O MÓDULO DE SEMIAUTOMATIZAÇÃO PARA TESTE DE EQUALIZAÇÃO EM PIEZÔMETROS DO TIPO <i>STANDPIPE</i> : TESTES E RESULTADOS	169
5.5	EXPERIMENTOS EM LABORATÓRIO COM TODO O SISTEMA EM CONJUNTO: TESTES E RESULTADOS	179
6	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	187
6.1	CONCLUSÕES	187
6.2	PROPOSTAS DE CONTINUIDADE E PESQUISAS FUTURAS	189
	REFERÊNCIAS	191

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS E RELEVÂNCIA

O Brasil destaca-se como um dos principais produtores mundiais de minério de ferro, além de ter a matriz energética predominantemente hidráulica. Tanto a atividade mineradora quanto a geração de energia hidrelétrica em grande medida dependem da utilização de barragens para garantir seu pleno funcionamento e atingir altos níveis de produtividade competitiva. É pertinente ressaltar que as barragens utilizadas na geração de energia diferem das barragens destinadas à contenção de rejeitos da mineração, embora apresentem semelhanças em alguns aspectos, com destaque para a necessidade de monitoramento e os instrumentos empregados.

Os dois tipos de estrutura de barragem se beneficiam amplamente da aplicação de piezômetros do tipo tubo aberto (*standpipe*) para o monitoramento das poropressões e subpressões (ICOLD, 1996). Portanto, o desenvolvimento de um dispositivo capaz de atender plenamente à necessidade evidente de aprimorar o processo de teste e validação da confiabilidade deste instrumento é de suma importância. A incorporação dos conceitos da Internet das Coisas (*IoT*, em inglês) no desenvolvimento deste sistema traz consigo os avanços mais recentes em termos de aquisição automática de dados, transmissão automática de dados, bem como gestão e processamento destas informações.

Durante a fase inicial da pesquisa foram consultados os mais relevantes bancos de dados de patentes, a fim de identificar a oportunidade de criação de um módulo exclusivo para a medição semiautomatizada dos testes de dissipação em piezômetros do tipo *standpipe* que, conforme afirmado por Silveira (2006), são considerados instrumentos de grande relevância e amplamente utilizados no monitoramento de barragens. Os principais bancos de dados consultados incluíram o Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), o *Espacenet*, o *ISI Web of Knowledge* e o *Google Patents*. Ao longo da pesquisa tornou-se evidente que a maioria das soluções semelhantes encontradas estava direcionada à automação da instrumentação de barragens em geral ou à automação dos testes de funcionamento de piezômetros e permeabilidade dos solos em laboratório.

As Tabela 1 e Tabela 2 a seguir apresentam as principais patentes nacionais e internacionais relacionadas à aquisição automática de dados na instrumentação de barragens e aos testes de equalização (permeabilidade).

Tabela 1 – Principais patentes nacionais e internacionais relacionadas à aquisição automática de dados de instrumentação de barragem e teste de equalização (permeabilidade)

Patentes Nacionais				
Título	IPC e CPC	Titular(es)	Inventor(es)	Data da Publicação
Equipamento e sistema de aquisição de dados para determinação da permeabilidade do solo ao ar	G01N 15/08 G01N 33/24 E02D 1/04	Universidade Federal do Paraná	Robson André Armando, Clayton Cerasomma Figueiredo	12/04/2016
Equipamento e sistema de aquisição de dados para medição automática de condutividade hidráulica de meios porosos	G01N 15/08	Universidade Federal do Paraná	André Augusto Mariano, Robson André Armindo, Fernando Kelvin da Silva Soares	06/02/2018
Sistema de aquisição de dados para equipamento de medida da permeabilidade de meios porosos quaisquer – principalmente do solo – ao ar	GOGF 17/40 G01 N 15/08 G01 N 11/00 G01 N 33/24	Universidade de São Paulo (USP)	Alexsandro dos Santos Brito, Jaedson Cláudio Anunciato mota, Luciano Roberto da Silveira, Paulo Leonel Libardi, Sergio Oliveira Moraes	03/04/2012

Fonte: INPI, *Espacenet*, *ISI Web of Knowledge* e *Google Patents*.

Tabela 2 – Principais patentes internacionais relacionadas à aquisição automática de dados de instrumentação de barragem e teste de equalização (permeabilidade)

Patentes Internacionais				
Título	IPC e CPC	Titular(es)	Inventor(es)	Data da Publicação
Ecological smart dam based on big data	E02B1/00 E02B7/06 G06F17/50 G06Q50/06	Hebei res institute of investigation & design of water conservancy & hydropower	Fu Changfeng, Han Liming, Yang Tieshu	06/07/2019
The invention discloses a single-channel data acquisition instrument special for hydraulic dam detection	G01D21/00	Wang Wenfeng	Wang Wenfeng	21/05/2019
Remote am monitoring system and method	G01D21/02 G01D21/02 (CN)	Beijing Guodian Gaoke tech co ltd	Guo Zhongjia, Jia Jiao, Li Yunpeng, Liu Qianyu, Liu Tao, Lyu Qiang, Ma Ping, Miao Chunan, Shan Liming, Song Bo, Tang Yao, Wang Miao, Zhang Jinwu, Zhu Lianzhi	02/10/2018
Portable dam monitoring data acquisition device	G01D21/02	Harbin Jinxing Microelectronics Tech co ltd; Hebei Zhanghewan Pumped Storage Power co ltd; Maintenance Branch State Grid Xinyuan Company ltd; State grid corp China; State Grid Xinyuan Company ltd	Dai Jianghong, Dong Xulong, Han Xiaotao, Li Hongwei, Li Zhihong, Ma Baodong, Qiu Wei, Tang Vouhu	07/08/2018
Middle -size and small - size embankment dam safety precaution monitoring system	G01D21/02	Beijing Beike Andi Tech Dev co ltd	Xie Mowen	08/06/2016
Dam observation data transmission system and method	G05B19/418 H04L29/06 H04L29/08	Electric Ower Res Inst State Grid Liaoning Electric Power Supply co ltd; Liaoning Dongke Electric Power; State Grid Corp China electric Power Research Institute, State Grid Liaoning Electric Power Supply co., ltd.; Liaoning Dongke Electric Power co., ltd.; State Grid Corporation of China	Huang Zhuo, Jing kai, Li Ming, Wang Qian, Yu Su Huang Zhuo, Jing kai, Li Ming, Wang Qian, Yu Su	16/04/2016

Fonte: INPI, Espacenet, ISI Web of Knowledge e Google Patents.

Durante a realização da pesquisa não foram encontrados dispositivos específicos que disponham de ferramentas dedicadas à realização automatizada de testes de equalização em piezômetros do tipo tubo aberto (*Casagrande/standpipe*) *in situ*, direcionados à automatização geral de instrumentos de monitoramento de barragens. Os resultados da pesquisa evidenciam que a tecnologia para aquisição, transmissão e modelagem de dados de monitoramento de barragens está consolidada e possui ampla aplicabilidade.

Artigos recentes publicados, tais como "*The High Precision Vibration Signal Data Acquisition System Based on The STM32*" de Zhu Hui-Ling e Zhu Xin-Yin (2014) no volume 172 da revista *Sensors & Transducers*, "*Bridge Vibration Monitoring System Based on Vibrating-Wire Sensor and ZigBee*" de Fu Qiang e Han Bing (2017) e "*Driving Circuit Design of Vibrating Wire Sensor Based on Frequency Sweep Mode*" de Sang Yong e Zhang Zengren (2020b), demonstram que a tecnologia está em constante evolução, com o surgimento de novas soluções, especialmente para aquisição de dados de instrumentos do tipo corda vibrante, que são amplamente utilizados no monitoramento de estruturas.

Entretanto, nas pesquisas realizadas em artigos de eventos e revistas científicas não foi identificado nenhum trabalho especificamente voltado para a automação dos testes de equalização em piezômetros do tipo tubo aberto realizados em campo (*in situ*). Foram encontrados diversos estudos direcionados exclusivamente à automação de testes similares de equalização em laboratório, bem como dispositivos voltados para a automação da aquisição de dados de forma geral. Isto evidencia a demanda existente para o desenvolvimento de uma ferramenta que atenda a essa necessidade específica.

O sistema desenvolvido recebeu a denominação de SADUMBA, que significa "Sistema de Aquisição de Dados Universal para Monitoramento de Barragens". No âmbito deste projeto foram concebidos dois dispositivos de hardware distintos, a saber:

- Placa Universal: esta placa desempenha a função integral de processamento de dados, comunicação e execução de tarefas gerais do sistema;
- Placa de Condicionamento de Sinais para Sensores de Corda Vibrante: este dispositivo foi projetado para realizar a leitura de instrumentos de corda vibrante e integrar-se à "Placa Universal" para gerenciamento conjunto.

Além disto, foram desenvolvidos diversos softwares destinados à gestão e processamento das funcionalidades propostas para o sistema. Estes programas foram minuciosamente enumerados e descritos na Seção 1.4 (Metodologia) deste trabalho.

1.2 MOTIVAÇÃO

A monitoração de barragens por meio de instrumentação é uma ferramenta fundamental para avaliar o desempenho das estruturas. Alinhado às inspeções visuais, que devem ser realizadas de forma contínua e obrigatória, o monitoramento é essencial para garantir a segurança desses empreendimentos (ICOLD, 2000). Neste contexto, a automação da instrumentação de monitoramento de barragens é necessária em determinadas situações (ICOLD, 2000). No entanto, é crucial que os proprietários e responsáveis por barragens tenham cuidado ao implementar a automação, uma vez que projetos realizados sem critérios adequados e profissionais qualificados podem comprometer o funcionamento adequado do sistema, gerando desconfiança em relação a essas tecnologias.

Um dos desafios neste processo é o alto custo dos dispositivos utilizados, especialmente no Brasil, onde a maioria deles é importada e possui um valor elevado.

Outra questão presente no cenário nacional é a falta de capacitação dos profissionais para lidar com estas tecnologias estrangeiras. O conhecimento necessário para operar estes sistemas é geralmente controlado por fornecedores internacionais, criando uma dependência e encarecendo ainda mais a formação e qualificação dos profissionais brasileiros para lidar com essas tecnologias.

Diante deste contexto, fica claro o incentivo para o desenvolvimento de um sistema que atenda às demandas do mercado nacional, com baixo custo, universalidade, baixo consumo de energia e suporte local no Brasil, tanto para operação quanto para instalação e manutenção. O sistema também contará com um módulo exclusivo para a realização de ensaios de equalização em piezômetros do tipo *standpipe*, também conhecidos como Casagrande, que são amplamente utilizados no monitoramento de barragens. Estes instrumentos requerem verificação de confiabilidade e, por meio deste sistema, esta verificação será mais precisa, eficiente e realizada com maior frequência devido à facilidade proporcionada pela solução.

Considerando a importância da análise da instrumentação, é necessário verificar regularmente estes instrumentos em intervalos de tempo constantes e bem definidos, a fim de assegurar a confiabilidade dos dados gerados. Portanto, os procedimentos, ensaios e testes para essas verificações são essenciais. Neste sentido, a semiautomatização do processo de teste de equalização apresenta inovação, buscando aprimorar o controle e padronizar os procedimentos para a realização destes testes, revelando-se ainda mais promissora devido ao vasto mercado que demanda por esta solução.

1.3 OBJETIVOS

O principal objetivo deste estudo é, em laboratório, desenvolver e validar um sistema de aquisição de dados universal para monitoramento de barragens, por meio de protótipos. A solução será cuidadosamente planejada para facilitar a transição entre o protótipo e a produção em escala, permitindo sua efetiva implementação no setor produtivo.

No planejamento inclui-se a busca por uma solução de baixo custo e baixa necessidade de manutenção a longo prazo, tornando-a competitiva no mercado e adequada para uso em estruturas localizadas em locais remotos e de difícil acesso para a implementação de tais tecnologias. Os testes experimentais em laboratório irão validar a solução em termos de funcionalidades, bem como as tecnologias e conceitos de *IoT* que serão aplicados visando aprimorar a produtividade e efetividade do monitoramento, aquisição e análise de dados por meio da utilização de Análise de Dados (“*Data Analytics*”).

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Projetar, implementar e testar um protótipo de "Placa Universal";
- Projetar, implementar e testar um protótipo de Placa de Condicionamento de Sinais;
- Projetar, implementar e testar em laboratório o protótipo da interface de monitoramento, que incluirá o módulo exclusivo para a semiautomatização do teste de equalização em piezômetros do tipo Casagrande de tubo aberto (*standpipe*);
- Criar um banco de dados histórico para armazenar as leituras realizadas pelo sistema.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do "Sistema de Aquisição de Dados Universal para Monitoramento de Barragens, com Teste de Equalização de Piezômetros, utilizando Internet das Coisas (*IoT*)", denominado SADUMBA, foi dividida em três fases distintas que serão apresentadas a seguir:

1ª fase:

- Realização de uma revisão de literatura abrangendo o monitoramento automatizado de barragens e o teste de equalização em piezômetros do tipo *standpipe*;

- Análise de artigos nacionais e internacionais que abordam a construção de dispositivos similares ao desenvolvido, com funcionalidade de leitura de instrumentos como corda vibrante e outros tipos;
- Levantamento de patentes internacionais e nacionais para comparação com as tecnologias existentes, a fim de fornecer subsídios para a solicitação de patente do dispositivo;
- Definição das métricas do "Sistema Remoto de Aquisição de Dados Universal com Teste de Equalização de Piezômetros Usando IoT";
- Especificação e definição dos requisitos da interface de armazenamento, gestão e processamento de dados.

2ª fase:

- Especificação dos componentes eletrônicos e realização de simulações para o funcionamento da "Placa Universal";
- Especificação dos componentes eletrônicos e simulações de funcionamento da Placa de Condicionamento de Sinais;
- Elaboração, fabricação e testes de hardware da "Placa Universal";
- Elaboração, fabricação e testes de hardware da Placa de Condicionamento de Sinais;
- Desenvolvimento e implementação do firmware da "Placa Universal", incluindo a implementação de protocolos de comunicação e funções de autogerenciamento;
- Desenvolvimento e implementação da lógica de leitura de sensores de corda vibrante no firmware da "Placa Universal", levando em consideração os sinais emitidos pela Placa de Condicionamento de Sinais;
- Realização de testes de conceito e funcionalidades da "Placa Universal";
- Realização de testes de conceito e funcionalidades da Placa de Condicionamento de Sinais;
- Implementação, teste de conceito e funcionalidades da interface de armazenamento, gestão e processamento de dados.

3ª fase:

- Realização de ensaios em laboratório dos dispositivos desenvolvidos, testando a leitura e armazenamento de diferentes tipos de sensores relacionados ao monitoramento de barragens, incluindo o sensor de corda vibrante utilizando a Placa de Condicionamento de Sinais desenvolvida;

- Simulação e teste em laboratório do módulo de teste de equalização em piezômetros do tipo *standpipe*;
- Apresentação dos resultados obtidos nos ensaios e simulações executadas.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O presente trabalho foi estruturado em capítulos distintos com o propósito de abordar de forma sistemática e detalhada os diferentes aspectos relacionados ao desenvolvimento do sistema SADUMBA. A organização do texto é apresentada a seguir.

Capítulo 1 — Introdução: neste capítulo foram apresentadas as considerações iniciais, a relevância do trabalho e a motivação que impulsionou sua realização. Os objetivos do estudo são estabelecidos, e a metodologia adotada para o desenvolvimento do sistema é descrita. Por fim, é apresentada a organização do texto, destacando a estrutura e os temas abordados em cada capítulo.

Capítulo 2 — Referencial Teórico e Estado da Arte: neste capítulo realiza-se uma revisão teórica abrangente sobre o monitoramento de barragens. São abordados os conceitos e as tecnologias utilizadas neste contexto, explorando a instrumentação de monitoramento de barragens. O capítulo também discute a automatização da instrumentação de barragens no Brasil, destacando os avanços, desafios e perspectivas. Também são apresentados os diferentes tipos de piezômetros, seu funcionamento e sua importância no monitoramento de barragens. A aplicação da Internet das Coisas (*IoT*) neste contexto é discutida, assim como a análise de dados e a cibersegurança.

Capítulo 3 — Desenvolvimento dos Dispositivos do Sistema: neste capítulo são apresentados os detalhes do desenvolvimento dos dispositivos do sistema SADUMBA. Descrevem-se as etapas do processo de desenvolvimento da "Placa Universal" e da Placa de Condicionamento de Sinais para a leitura de sensores de corda vibrante. Também é abordada a elaboração do firmware da "Placa Universal", com a implementação dos protocolos de comunicação e funções de autogerenciamento. Por fim, são apresentadas as configurações do servidor e do sistema de gestão e processamento de dados.

Capítulo 4 — Desenvolvimento do Módulo de Teste de Equalização em Piezômetros do tipo *standpipe*: neste capítulo são apresentados os detalhes do desenvolvimento do Módulo de Teste de Equalização em Piezômetros do tipo *standpipe*. Descrevem-se as etapas do desenvolvimento do algoritmo, destacando suas principais características e funcionalidades.

Capítulo 5 — Teste em Laboratório para Validação da Solução: neste capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados em laboratório para validar a solução desenvolvida. Descrevem-se os experimentos realizados com a "Placa Universal", a Placa de Condicionamento de Sinais, o módulo de semiautomação para teste de equalização em piezômetros do tipo *Standpipe* e o sistema em conjunto.

Capítulo 6 — Conclusões e Propostas de Continuidade: no último capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho realizado, destacando os principais resultados e contribuições. Também são apresentadas propostas de continuidade e sugestões para pesquisas futuras, visando aprimorar e ampliar o Sistema de Aquisição de Dados Universal para Monitoramento de Barragens.

2 REFERENCIAL TEÓRICO E ESTADO DA ARTE

2.1 VISÃO GERAL DA INSTRUMENTAÇÃO DE MONITORAMENTO DE BARRAGENS

A instrumentação de barragens é considerada uma ferramenta essencial para engenheiros e técnicos responsáveis pela segurança das estruturas, conforme afirmado por Silveira (2006). Esta instrumentação fornece informações em todas as fases da vida útil da barragem, permitindo uma tomada de decisão mais segura e até mesmo previsões sobre o comportamento futuro da estrutura.

Dentre os vários instrumentos utilizados no monitoramento de barragens, que medem variáveis físicas importantes como deslocamentos, recalques, tensões, vazões e pressões, destaca-se o piezômetro, um instrumento amplamente utilizado para medir pressões em barragens. Neste trabalho, o piezômetro será utilizado para testar o equipamento de aquisição de dados desenvolvido.

Conforme Silveira (2006), todos os instrumentos de monitoramento de variáveis físicas em barragens devem atender a questões específicas da estrutura em questão. Em outras palavras, se não houver questões a serem respondidas pelos instrumentos de monitoramento, não há necessidade de instalá-los.

De acordo com o Boletim 118 do ICOLD (2000), o monitoramento para garantir a segurança das barragens possui dois pilares fundamentais: inspeções visuais regulares em todos os elementos estruturais e adjacências da barragem, e o monitoramento contínuo da barragem por meio de instrumentação. Dentro deste contexto, as principais atividades relacionadas ao monitoramento de barragens por meio de instrumentação incluem: realizar medições com os instrumentos para obter dados das variáveis relevantes para a estrutura em questão, coletar e validar os dados obtidos, processar e analisar os dados coletados inicialmente, e, por fim, interpretar e apresentar os resultados. A Figura 1 ilustra o processo descrito.

Figura 1 – Processo de monitoramento de barragens com coleta de dados manual



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Antes da disseminação das tecnologias de monitoramento automatizado em barragens, todas as atividades relacionadas ao monitoramento eram realizadas manualmente, principalmente nos primeiros instrumentos instalados com o propósito de monitorar as estruturas. Conforme destacado no Boletim 118 do ICOLD (2000), embora o desenvolvimento dos computadores na década de 1970 tenha facilitado o processamento e a apresentação dos dados, as leituras dos instrumentos ainda eram e continuam sendo feitas manualmente por indivíduos presentes no local da barragem.

Realizar leituras manuais em instrumentos instalados em certos locais de algumas barragens pode ser um desafio assustador e perigoso, especialmente em condições climáticas adversas e em barragens situadas em áreas sujeitas a condições atmosféricas extremas. Além disto, locais de difícil acesso ou espaços confinados também podem representar riscos significativos, assim como durante períodos críticos, como inundações ou terremotos, a realização das medições torna-se uma tarefa de alto risco do ponto de vista da segurança no trabalho.

2.2 AUTOMATIZAÇÃO DE INSTRUMENTAÇÃO DE BARRAGENS NO BRASIL

Nos últimos anos, o setor de segurança de barragens no Brasil tem enfrentado um processo contínuo de modernização da instrumentação de monitoramento. Este processo ocorre tanto por meio de planos de reinstrumentação — que têm sido amplamente implementados, especialmente em barragens construídas nas décadas de 1960 e 1970, período marcado pela

construção das grandes barragens brasileiras — quanto pela automatização do monitoramento. Um exemplo desta automatização parcial é observado na UHE Ilha Solteira, cuja construção teve início em 1967 e foi inaugurada em 1973. No ano de 2023, a barragem passou pelo processo de automatização parcial da instrumentação de monitoramento (Bastos; Ramos; Carvalho, 2021).

Embora a automação da instrumentação seja comum em processos industriais, sua aplicação no monitoramento de barragens ainda não é amplamente adotada no Brasil. Dentre outros motivos, isto ocorre devido à baixa variabilidade dos dados coletados pelos instrumentos ao longo do tempo, especialmente em usinas classificadas como "a fio d'água", cujos reservatórios apresentam flutuações menores ao longo do tempo.

Porém, nos últimos anos tem-se observado um aumento na automatização dos instrumentos de monitoramento em barragens no Brasil, conforme relatado por diversos autores. A Tabela 3 apresenta algumas barragens de usinas hidrelétricas brasileiras que passaram pelo processo de automatização da instrumentação nos últimos 18 (dezoito) anos.

Tabela 3 – Exemplos de barragens de usinas hidrelétricas brasileiras que tiveram sua instrumentação automatizada nos últimos 18 anos

Barragem	Empresa	Ano	Tipo de Instrumentos automatizados e/ou semiautomatizados
UHE Queimado	CEMIG GT	2023	PZ, MV e INA
UHE Ilha Solteira	CTG Brasil	2022	PZ, MV, INA, MT e EH
UHE Salto	CTG Brasil	2021	PZ, MV e INA
UHE Três Marias	CEMIG GT	2020	PZ, MV e INA
PCH Piau	CEMIG GT	2019	PZ, MV e INA
UHE Irapé	CEMIG GT	2018	PZ, MV E CW
UHE Miranda	CEMIG GT	2017	PZ, MV, PD, MT e EH
UHE Foz de Chapecó	Foz do Chapecó Energia S.A.	2015	PZ, MT, EH
UHE Barra Grande	Energética Barra Grande S.A	2015	PZ, MV, MT, EMH, EH, MR
UHE Porto Primavera	CESP	2007	PZ, MV, MT, EH, PD e PI
Itaipu	ITAIPU Binacional	2005	PZ, MV, PE, EH, PD e PI
Sobradinho	CHESF	2003	PZ e MV

Legenda:

PZ: Piezômetro de Tubo aberto MV: Medidor de vazão PE: Piezômetro Elétrico
 EH: Extensômetro de Haste PD: Pêndulo Direto PI: Pêndulo Invertido
 EJ: Extensômetro de junta TT: Termômetro CW: Célula de pressão
 INA: Indicador de Nível d'água MT: Medidor de junta triortogonal

Fonte: Adaptado de Andrade (2018).

É importante salientar que a implementação de sistemas de monitoramento automatizados em barragens de rejeitos tem ocorrido de forma mais acelerada em comparação com as

barragens destinadas à geração de energia e contenção de água. Esta disparidade em grande parte é justificada pelo maior risco associado e pela necessidade de cumprir exigências legais recentemente estabelecidas para barragens de mineração.

Um exemplo dessas exigências é a Portaria Nº 70.389, publicada em 17 de maio de 2017 pelo extinto Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) – atual Agência Nacional de Mineração (ANM) – e a Resolução Nº 95, publicada pela ANM, atual órgão regulamentador do setor mineral no Brasil, em 7 de fevereiro de 2022, as quais determinam a necessidade de implementação de sistemas de monitoramento automatizado em parte das barragens de mineração, dependendo de suas características.

Neste sentido, observa-se um desenvolvimento significativo na implantação de sistemas nas barragens de rejeitos em Minas Gerais. De acordo com Penido (2017), até o ano de 2017, as principais barragens automatizadas em áreas de mineração em Minas Gerais foram as Minas de Cauê, Fábrica, Pico, Capitão do Mato, Conceição e Águas Claras da empresa Vale. Segundo o mesmo autor, os principais instrumentos automatizados utilizados incluem piezômetros do tipo Casagrande com transdutores de corda vibrante, medidores de vazão com transdutores ultrassônicos e transdutores de corda vibrante como sensores do tipo *Weir-monitor*, marcos de superfície com instrumentação de monitoramento geodésico automatizado, células de pressão total utilizando diversas tecnologias e inclinômetros *in-place* principalmente.

Com base no contexto apresentado acima, pode-se constatar que a automatização da instrumentação em barragens no Brasil já está em andamento. No entanto, observa-se uma concentração das grandes empresas na aquisição destas tecnologias, uma vez que as soluções disponíveis no mercado atualmente são bastante dispendiosas.

2.3 PIEZÔMETROS

Os piezômetros desempenham a função de medir as subpressões e poropressões em aterros ou fundações de barragens (Silveira, 2006). Estes instrumentos são essenciais para que os engenheiros responsáveis pela segurança destas estruturas possam monitorar seu desempenho e comportamento, tanto durante a construção quanto durante a operação e até mesmo no processo de desativação.

Existem diferentes tipos de piezômetros utilizados no monitoramento de barragens, tais como piezômetros hidráulicos, do tipo Corda vibrante, piezoresistivos, piezômetros pneumáticos e piezômetros do tipo Casagrande de tubo aberto e fechado, entre outros. Neste contexto, neste trabalho serão abordados os piezômetros do tipo tubo aberto, pois, são

amplamente utilizados no Brasil e em todo o mundo para o monitoramento de barragens (Silveira, 2006).

O piezômetro Casagrande de tubo aberto tem a função de registrar a carga piezométrica (poropressão) no ponto de instalação ou a subpressão quando instalado nas fundações das estruturas. Este dispositivo é constituído por um tubo de PVC com furos em sua extremidade inferior, que é inserido em um furo de sondagem. A extremidade do tubo é envolvida com material arenoso, permitindo a passagem da água e formando a célula do piezômetro. Acima da célula é colocada uma vedação de bentonita (argila pouco permeável) para evitar a passagem de água. Em seguida é utilizado solo-cimento ou, em alguns casos, solo do próprio aterro até a extremidade superior do tubo (Silveira, 2006).

A leitura deste instrumento é realizada por meio de uma sonda de nível elétrica, conhecida popularmente como "sonda pio". Esta sonda consiste em uma trena graduada com uma ponta condutora que possui um circuito aberto. Quando em contato com a água, o circuito é fechado, emitindo um som que indica o comprimento do tubo vazio. Para uma leitura precisa, é necessário conhecer o comprimento total do tubo (Silveira, 2006).

No entanto, é importante ressaltar que ao longo da vida útil de uma barragem, o arranjo do piezômetro do tipo Casagrande pode sofrer alterações, comprometendo a confiabilidade das medições realizadas. Portanto, é necessário realizar um ensaio chamado "ensaio de equalização", que tem como objetivo avaliar a eficiência do instrumento e verificar se ele atende aos parâmetros de funcionamento. Além disto, o ensaio de equalização, em sua concepção original, visa determinar o coeficiente de permeabilidade dos solos, entre outras informações (Silveira, 2006).

Atualmente, este ensaio é realizado de forma totalmente manual, o que compromete os resultados, a precisão e até mesmo a viabilidade de sua execução, uma vez que demanda mobilização de pessoal, tempo e custos. No entanto, espera-se que este trabalho contribua para o desenvolvimento de uma solução que automatize ou, pelo menos, semiautomatize este processo, visando aumentar a confiabilidade do ensaio e, conseqüentemente, melhorar o controle da segurança das estruturas.

Os piezômetros são instrumentos de grande importância no monitoramento de barragens, tanto para as fundações quanto para os maciços de terra e enrocamento. Eles são utilizados para medir a poropressão e a subpressão em pontos específicos do aterro ou da fundação, permitindo o monitoramento das pressões previstas nos cálculos de projeto. Os medidores de nível d'água são empregados para medir o nível freático. Para um entendimento completo das variáveis

monitoradas pelo piezômetro *standpipe*, é fundamental compreender a diferença entre nível freático, poropressão e subpressão, que são objetos de estudo na área da geotecnia.

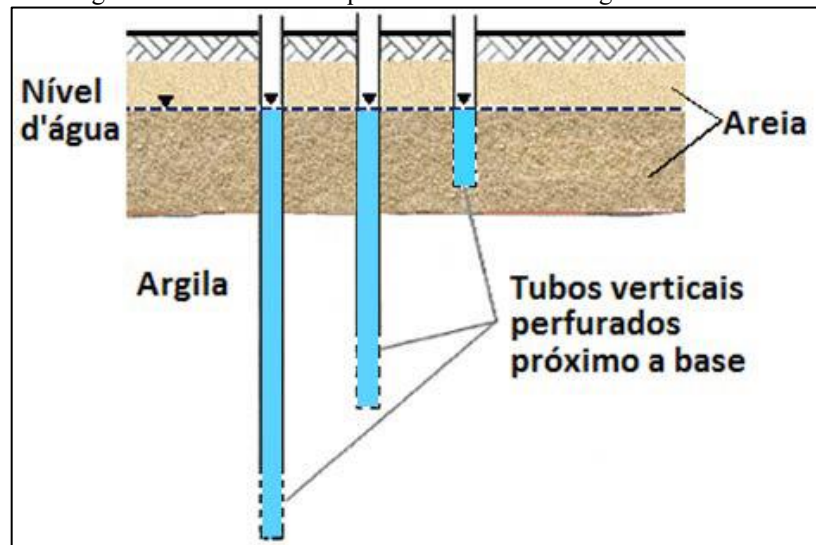
2.3.1 Nível freático

Conforme definido por Silveira (2006), o nível freático representa a superfície superior de um corpo d'água subterrâneo, onde a pressão hidrostática é equivalente à pressão atmosférica. Quando não há fluxo de água no interior de um maciço, como ilustrado na Figura 2, pode-se observar que a poropressão aumenta de forma uniforme com a profundidade, mantendo o nível piezométrico e freático em equilíbrio.

É importante destacar que o nível freático é influenciado por diversos fatores, tais como a precipitação pluviométrica, a infiltração de água no solo, a permeabilidade do maciço e a presença de camadas impermeáveis ou de lençóis freáticos adjacentes. Estas condições podem levar a variações no nível freático ao longo do tempo e em diferentes locais.

O monitoramento adequado do nível freático é essencial para a estabilidade de estruturas como barragens, visto que alterações significativas neste nível podem indicar problemas de drenagem, saturação excessiva do solo ou até mesmo riscos de liquefação. Portanto, o uso de piezômetros se mostra fundamental para a obtenção de dados precisos sobre o comportamento do nível freático e a poropressão em diferentes pontos do maciço.

Figura 2 – Nível freático quando não há fluxo d'água subterrânea



Fonte: Adaptado de Silveira (2006).

2.3.2 Poropressão

A poropressão, também conhecida como pressão neutra, refere-se à pressão exercida pela água nos espaços vazios (poros) do solo, atuando em todas as direções. É comumente medida em aterros de barragens (Silveira, 2006).

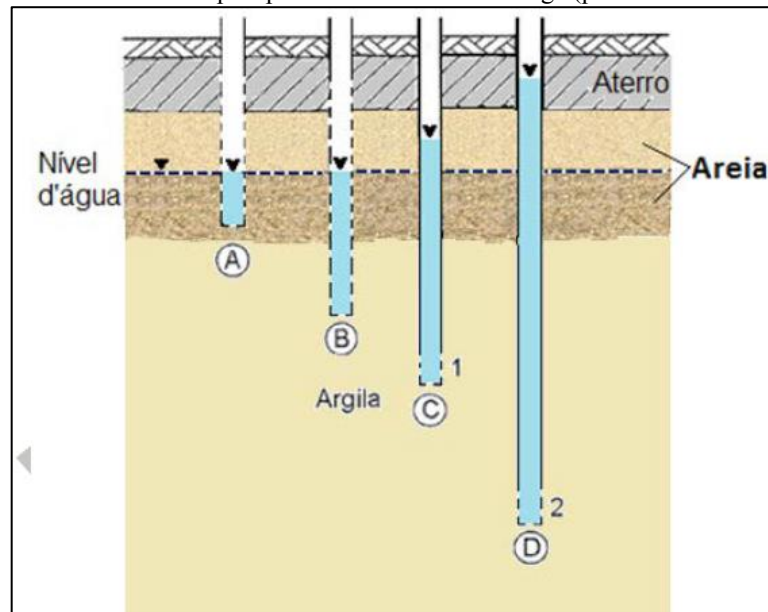
Quando ocorre o fluxo de água, em contraste com a situação apresentada Figura 2, ou seja, quando há variação na carga hidráulica total, o nível piezométrico fica desequilibrado. A Figura 3 ilustra a situação resultante da sobrecarga de um aterro sobre uma camada de areia, logo após sua execução. Neste caso, a consolidação da areia ainda não foi concluída, resultando no aumento da poropressão na camada de argila e no desequilíbrio do nível freático.

Conforme evidenciado na Figura 3, os tubos A e B, perfurados ao longo de sua extensão, indicam apenas o nível freático e são denominados Medidores de Nível d'água. Por estar perfurado ao longo das camadas, o tubo B estabelece uma conexão entre essas camadas, permitindo a dissipação completa da poropressão na camada permeável de areia, indicando apenas o nível freático. Os tubos C e D, ainda na Figura 3, representam os piezômetros e indicam as poropressões na camada de argila nas profundidades 1 e 2, respectivamente. A carga piezométrica no tubo C é menor do que no tubo D devido à maior proximidade da camada de areia, o que auxilia na dissipação da poropressão (Silveira, 2006).

A compreensão da poropressão e sua distribuição ao longo do maciço de solo são fundamentais para o projeto e a análise de barragens. Através do uso de piezômetros e medidores de nível d'água, é possível obter informações cruciais sobre as variações da poropressão, permitindo uma avaliação mais precisa do comportamento hidrogeológico do

maciço e auxiliando no projeto adequado de sistemas de drenagem e controle de percolação de água em barragens.

Figura 3 – Nível freático e poropressão devido à sobrecarga (processo de adensamento)



Fonte: Adaptado de Silveira (2006).

2.3.3 Subpressão

As subpressões referem-se às poropressões observadas na fundação da barragem, enquanto as poropressões propriamente ditas são medidas no aterro do barramento. De acordo com Silveira (2006), as subpressões são particularmente relevantes na análise das condições de estabilidade da barragem, uma vez que atuam de baixo para cima na fundação. É importante observar as subpressões nos principais horizontes da fundação, tais como o contato solo-rocha, saprólito-rocha (ou concreto-rocha no caso de barragens de concreto), níveis e camadas mais permeáveis da fundação e proximidades da base da barragem.

Também o filtro horizontal e o tapete drenante de uma barragem são regiões de interesse especial. No entanto, por fazerem parte da estrutura do barramento em si, a instrumentação nestas áreas é considerada parte da instrumentação da barragem, não da fundação (Silveira, 2006).

O monitoramento adequado das subpressões e poropressões na fundação e no aterro da barragem é essencial para avaliar, não somente a estabilidade da estrutura, mas mitigar outros modos de falha e aumentar a segurança do empreendimento. Através da instrumentação apropriada, é possível obter dados precisos sobre as variações dessas pressões ao longo do

tempo, permitindo uma análise criteriosa e auxiliando na tomada de decisões relacionadas ao projeto, operação e manutenção da barragem.

2.3.4 Tipos de Piezômetros

No que diz respeito ao tempo de resposta, existem basicamente dois tipos de piezômetros utilizados no monitoramento de barragens: os de resposta lenta e os de resposta rápida. Os piezômetros de resposta lenta aplicados em barragens são do tipo *standpipe*, também conhecidos como piezômetros Casagrande, em homenagem ao engenheiro geotécnico Arthur Casagrande, notável criador deste tipo de instrumento. Os piezômetros *standpipe* são amplamente utilizados devido à sua facilidade de instalação e manutenção, sendo preferenciais para o monitoramento das fundações e maciços das barragens. Por outro lado, os piezômetros de resposta rápida são compostos por um diafragma localizado entre a parte filtrante e o transdutor de pressão, de forma que um pequeno volume de água é suficiente para indicar uma pressão. Diversos tipos de piezômetros de resposta rápida são empregados no monitoramento de barragens, sendo alguns deles especialmente destacados, tais como: corda vibrante, resistência elétrica, fibra óptica, piezômetros hidráulicos, piezômetros pneumáticos e piezômetros elétricos magnéticos (sem cabos).

Tanto os piezômetros de resposta lenta, como o piezômetro Casagrande, quanto os modelos de resposta rápida, como o piezômetro elétrico de corda vibrante, são amplamente utilizados no Brasil e no mundo para o monitoramento de barragens. Inclusive, no plano de instrumentação convém considerar diferentes tipos de instrumentos. Portanto, estes dois tipos de piezômetros serão o foco central deste estudo. O sistema a ser desenvolvido será capaz de ler, armazenar, transmitir e processar as leituras dos piezômetros elétricos de corda vibrante. Além disto, considerando que o piezômetro de corda vibrante pode ser instalado dentro de um piezômetro *standpipe*, como evidenciado por Cerqueira (2017), o sistema será capaz de realizar testes de equalização para verificar as condições plenas de funcionamento dos piezômetros *standpipe*.

2.3.4.1 Piezômetro Standpipe (Tubo aberto)

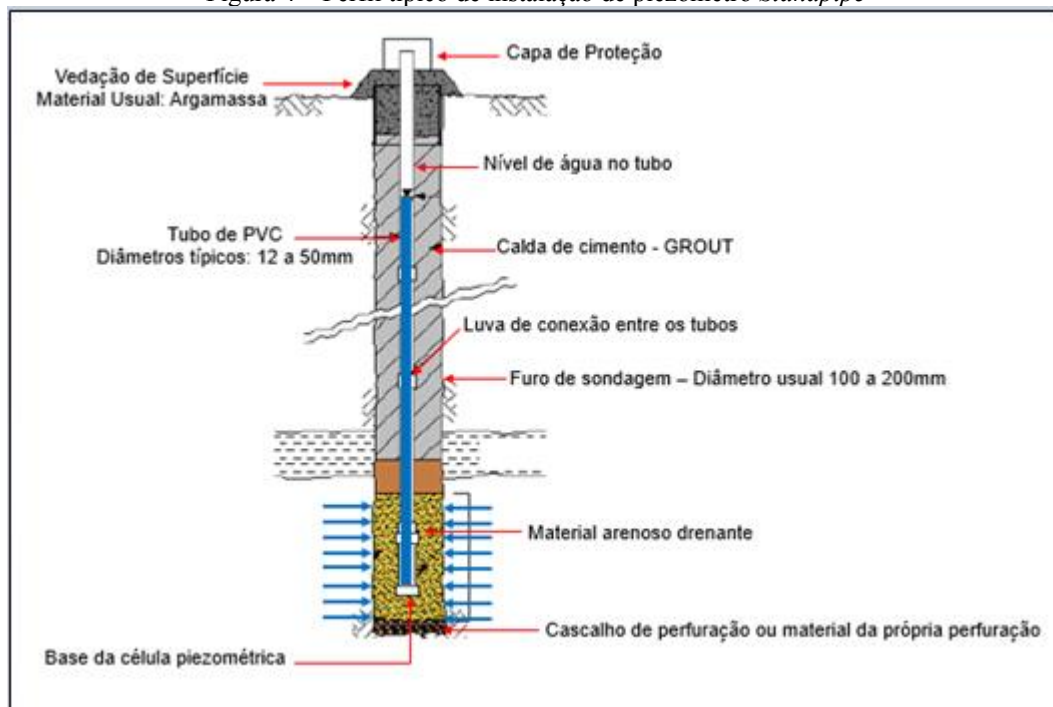
O piezômetro *standpipe* é um tipo de instrumento utilizado para medir a carga de pressão em um local específico. Ele consiste em um bulbo que é inserido no ponto de interesse e

conectado a um tubo que permite a leitura da pressão. O comprimento do bulbo é determinado de acordo com a espessura do local a ser monitorado e geralmente varia entre 50,0 e 300,0 cm.

Antes da instalação, o bulbo do piezômetro é colocado em um furo de sondagem previamente limpo e é envolvido por uma camada de areia, a fim de facilitar a entrada da água pressionada e evitar a obstrução do bulbo por materiais finos. Uma camada de bentonita ou solo-cimento é aplicada sobre a camada de areia para isolar o bulbo, permitindo a medição da pressão no ponto de interesse sem haver comunicação com outras camadas do maciço. O restante do furo é preenchido com solo natural ou pasta de cimento, dependendo se o furo foi realizado em solo ou rocha.

Em um mesmo furo de sondagem é possível instalar vários piezômetros *standpipe* para medir a pressão em diferentes níveis. A Figura 4 ilustra um perfil típico de instalação de um piezômetro *standpipe*, apresentando detalhes do bulbo piezométrico.

Figura 4 – Perfil típico de instalação de piezômetro *Standpipe*



Fonte: Adaptado de Cerqueira (2017).

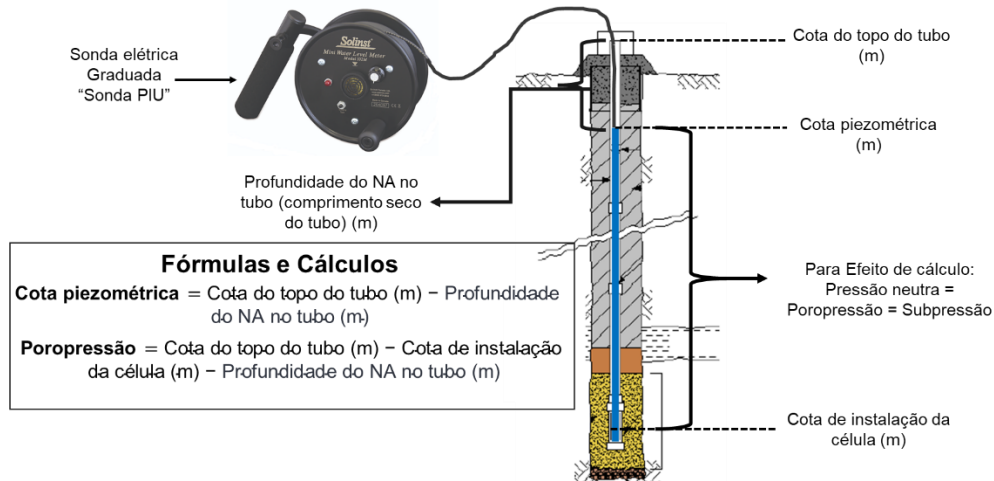
O cálculo da pressão em um piezômetro *Standpipe* é realizado por meio da diferença entre a cota do nível de água no interior do tubo, medida em cada ocasião, e a cota do ponto médio do bulbo poroso. Esta relação é ilustrada na Figura 5.

Para obter a pressão é necessário medir a cota do nível d'água no interior do tubo utilizando um dispositivo apropriado. Em seguida, a cota do ponto médio do bulbo poroso é

determinada com base em seu posicionamento e características geométricas. A diferença entre essas cotas fornece a medida da pressão hidrostática no ponto de interesse.

A Figura 5 apresenta um esquema demonstrando esta relação, permitindo a visualização do processo de cálculo da pressão em um piezômetro *standpipe*.

Figura 5 – Forma de leitura de um piezômetro *standpipe*, utilizando a sonda elétrica “piu”.

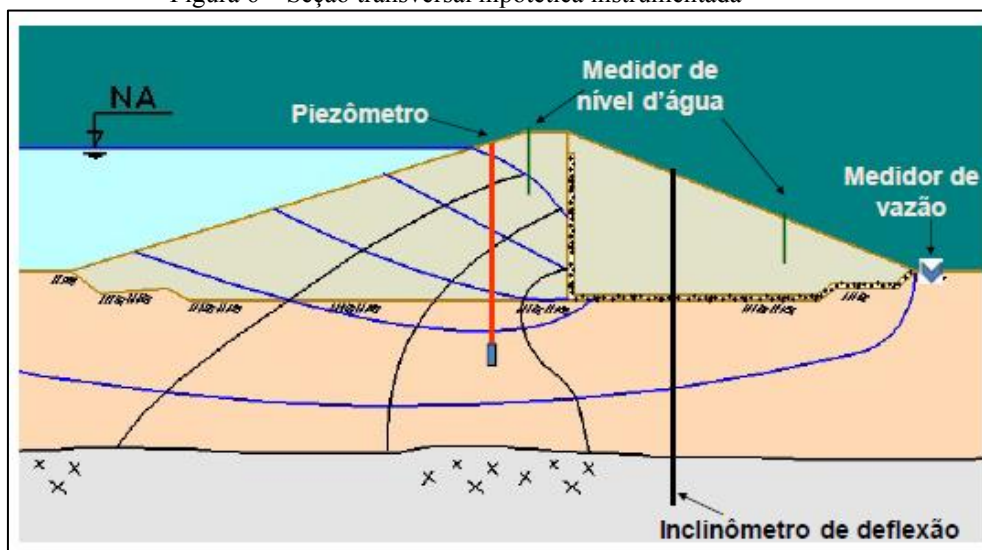


Fonte: Adaptado de Cerqueira (2017).

Os piezômetros do tipo Casagrande *standpipe* são amplamente empregados na monitoração das subpressões em fundações e das poropressões em maciços de barragens, sendo essenciais para verificar a estabilidade destas estruturas. A Figura 6 apresenta uma seção transversal hipotética de uma barragem de terra, na qual são destacadas as posições dos instrumentos de monitoramento. Um piezômetro do tipo *standpipe* é instalado na fundação, enquanto medidores de nível d'água são utilizados para acompanhar o nível freático. Um medidor de vazão também é empregado para monitorar a quantidade de água percolada pela barragem, e um inclinômetro de deflexão é utilizado para registrar os deslocamentos da estrutura.

A correta observação destes parâmetros é de extrema importância para o monitoramento e a tomada de decisões relacionadas à segurança das barragens, uma vez que variações nas subpressões, poropressões, nível freático e deslocamentos podem indicar potenciais problemas e requerer ações mitigadoras.

Figura 6 – Seção transversal hipotética instrumentada



Fonte: Elaborado a partir de notas de aula, curso de instrumentação de barragens, FUSARO Engenharia e Consultoria (2019).

2.3.4.2 Piezômetro elétrico de corda vibrante

Os piezômetros de corda vibrante, também conhecidos como "*vibrating wire piezometers*", desempenham um papel fundamental no monitoramento de barragens. São especialmente úteis em locais onde a instalação de piezômetros de tubo aberto é impraticável ou em locais de difícil acesso, oferecendo maior flexibilidade na escolha da posição do instrumento na estrutura. Eles permitem uma resposta rápida em casos em que é necessária uma monitoração ágil. A capacidade de leitura remota dos dados coletados é viabilizada pela utilização de sensores elétricos, graças aos sistemas de aquisição e transmissão automática de dados.

Estes instrumentos seguem o mesmo princípio de funcionamento, diferenciando-se apenas nos arranjos internos e, conseqüentemente, nos parâmetros de configuração e calibração, de acordo com a grandeza que se deseja medir. Seu funcionamento baseia-se em um fio de aço tracionado, com uma das extremidades presa a um diafragma, que sofre deformações em função do aumento da pressão externa, como poropressões e subpressões. Ao ser eletricamente excitado por uma bobina, o fio gera vibrações. A frequência de ressonância destas vibrações é proporcional à tensão no fio, a qual varia conforme a pressão externa.

De acordo com Sang e Zhang (2020b), o transdutor de corda vibrante é construído com um fio de metal tensionado, utilizado como elemento sensível às variações causadas pelos fatores externos, como a pressão da água nos piezômetros. Geralmente, aços inoxidáveis são

empregados para esta finalidade. O comprimento da corda de metal, a tensão mecânica e a densidade do fio vibratório determinam sua frequência de ressonância.

O valor da frequência ressonante está diretamente relacionado à tensão externa e à tensão de compressão aplicada ao fio, a qual reflete as mudanças na tensão externa mencionadas anteriormente. A medição da frequência do sensor de corda vibrante envolve dois processos: o processo de estimulação e o processo de leitura. A frequência de ressonância é determinada pela equação (2.1), conforme apresentado a seguir.

$$F_i = \frac{1}{2L} x \sqrt{\frac{T}{p}} \quad (2.1)$$

Onde:

F_i – Frequência de ressonância do sensor (Hz)

L – Comprimento da corda vibrante (m)

T – Tensão mecânica do fio vibratório (N)

p – Densidade do fio vibratório (Kg/m^3)

Conforme citado e de acordo com Pop (2013), as medições de frequência em um transdutor de corda vibrante geralmente envolvem um processo de duas etapas: a excitação do fio, em seguida a medição da resposta do fio ao longo de um período para determinar sua frequência de vibração. A forma de onda de excitação deve abranger uma ampla faixa de frequência, como um sinal de varredura de frequência, para fornecer energia suficiente na frequência de ressonância. Uma vez que o sensor é excitado na frequência de ressonância, o sinal aplicado é refletido, apresentando a maior amplitude na frequência de vibração da corda do sensor.

A partir dos valores de frequência obtidos, são aplicadas fórmulas de correlação para determinar a pressão e, conseqüentemente, a altura da coluna de água no ponto monitorado. Um exemplo de fórmula de correlação utilizada em piezômetros de corda vibrante é apresentado a seguir. Devido ao tipo de sinal gerado, esses sensores são compatíveis com sistemas de monitoramento remoto e transmissão de dados. Existem diversos tipos de transdutores de corda vibrante que podem ser amplamente aplicados, como extensômetros de corda vibrante, medidores de nível do tipo *Weir Monitor* de corda vibrante, entre outros.

É importante ressaltar que nas fórmulas de correlação, conforme apresentado a seguir, o valor da frequência utilizado é transformado em uma unidade de medida denominada "dígito"

nos manuais de alguns fabricantes. Esta unidade corresponde ao valor da frequência de ressonância elevada ao quadrado e dividida por mil. A equação (2.2) a seguir ilustra o cálculo das pressões em piezômetros de corda vibrante do modelo Geokon 4500 Series.

$$P = G \times (Fi - F) - K \times (Ti - T) \quad (2.2)$$

Onde:

P – Pressão (kPa)

G – Fator de calibração linear do sensor (kPa/dígito)

Fi – Dígito inicial (Hz²/1000)

F – Dígito final (Hz²/1000)

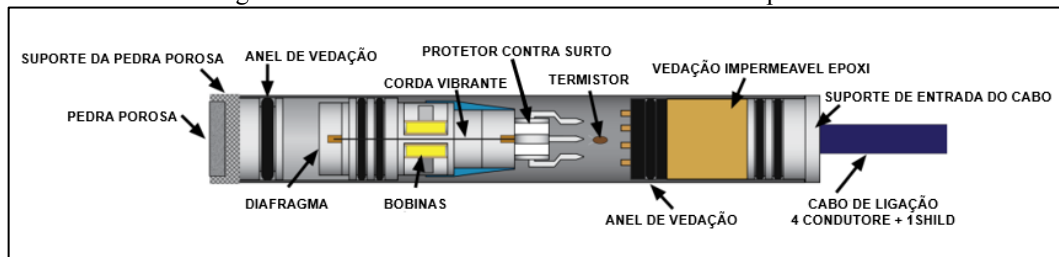
K – Fator de calibração de temperatura (kPa/°C)

Ti – Temperatura inicial (°C)

T – Temperatura final (°C)

Os instrumentos atualmente utilizados, além do transdutor de pressão de corda vibrante, são compostos por termistores para medir a temperatura inicial (durante a calibração do sensor) e a temperatura final (em medições subsequentes), a fim de corrigir a influência da temperatura no transdutor. Também incluem supressores de surtos para proteção contra sobretensões elétricas, um elemento de extrema importância, especialmente considerando que esses dispositivos são frequentemente instalados em locais com alta probabilidade de ocorrência de descargas atmosféricas. A Figura 7 apresenta um modelo esquemático com os componentes internos de um piezômetro de corda vibrante, modelo 4500S do fabricante Geokon.

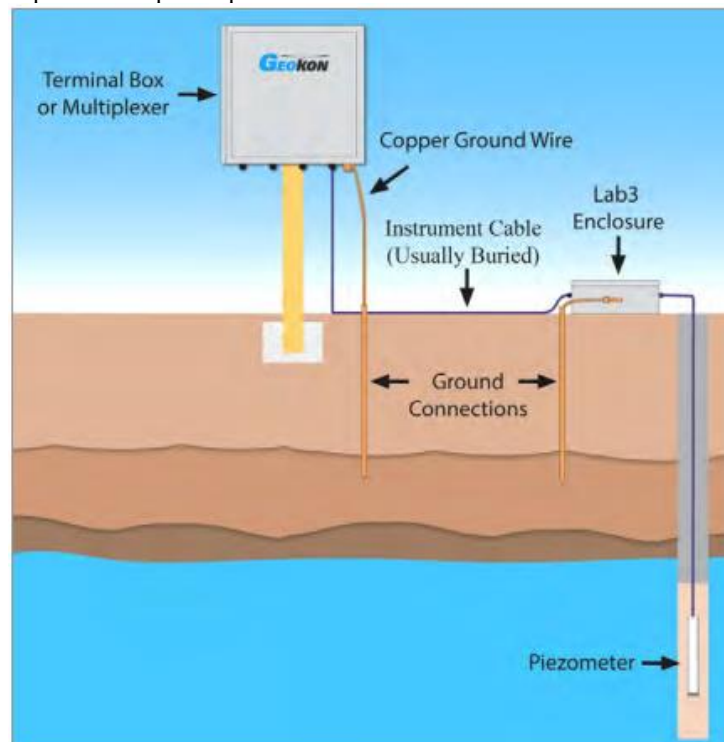
Figura 7 – Piezômetro de corda vibrante e seus componentes



Fonte: Adaptado do manual piezômetro modelo 4500S Geokon.

Por fim, a Figura 8 apresenta um esboço ilustrativo de uma instalação típica de um piezômetro de corda vibrante, implantado diretamente em um aterro para medir as poropressões. O esboço também mostra os dispositivos de leitura associados a esse piezômetro. Esta representação foi extraída do manual dos piezômetros de corda vibrante Geokon modelo 4500 Series.

Figura 8 – Croqui de exemplo de piezômetro de corda vibrante instalado diretamente em aterro



Fonte: Manual Piezômetro Geokon 4500 series.

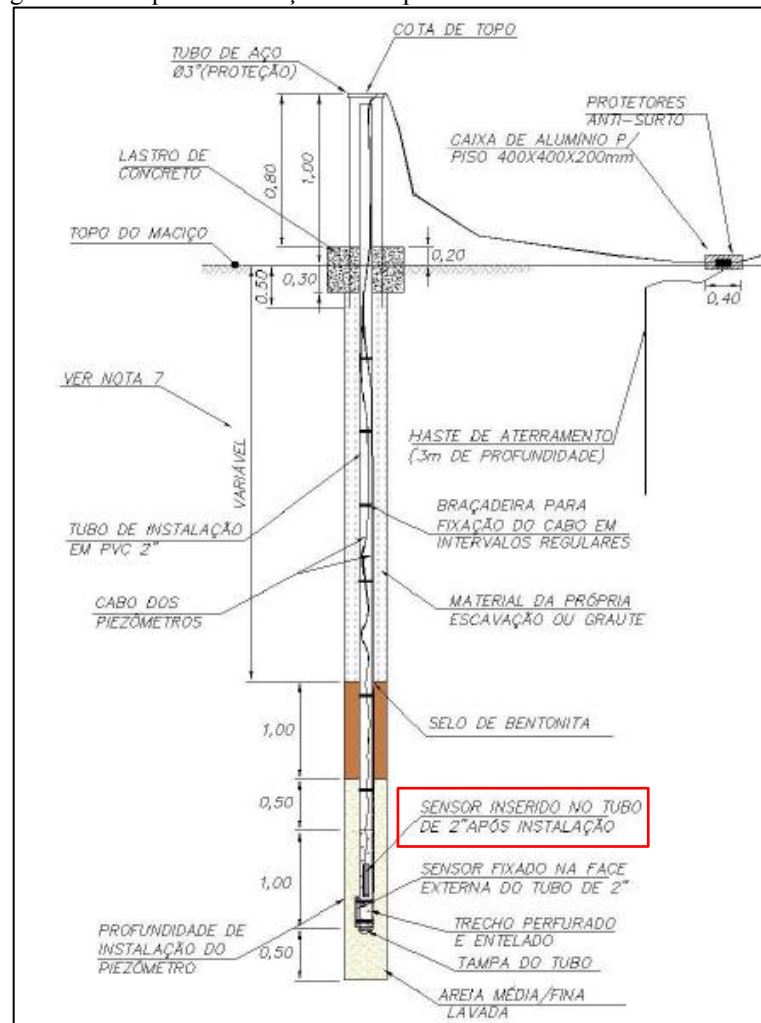
2.3.5 Automatização de piezômetros do tipo standpipe (tubo aberto)

A automatização das leituras dos piezômetros do tipo *standpipe* representa uma significativa inovação tecnológica na engenharia geotécnica, revolucionando a forma como a pressão da água em estruturas é monitorada e registrada.

Através da automatização destes piezômetros, utilizando sensores e sistemas de aquisição automática de dados, é possível obter informações de forma contínua, precisa e em intervalos predeterminados. A Figura 9 apresenta um esboço de instalação de um piezômetro de corda vibrante inserido em um piezômetro standpipe, com o objetivo de automatizar as leituras, acompanhado de um sistema de aquisição automática de dados.

A proposta de automatizar as leituras de um piezômetro standpipe por meio de um piezômetro de corda vibrante, conforme ilustrado na Figura 9, foi discutida por Cerqueira et al. (2016) durante o XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Ainda segundo Cerqueira et al. (2016), a prática de automatização de piezômetros standpipe é amplamente adotada no Brasil, principalmente para a automatização das leituras de piezômetros já instalados em barragens existentes.

Figura 9 – Croqui de instalação de um piezômetro elétrico de corda vibrante



Fonte: Cerqueira *et al.* (2016).

A automatização das leituras dos piezômetros *standpipe* tem se mostrado uma solução fundamental para aprimorar a gestão geotécnica, resultando em diversos benefícios significativos. Dentre eles, destaca-se o aumento da eficiência na obtenção de dados, a capacidade de realizar leituras tanto manuais quanto automáticas e a tomada de decisões embasada em informações verificadas e atualizadas.

A utilização de piezômetros *standpipe* automatizados permite a coleta de dados de forma mais rápida e precisa, proporcionando uma análise mais detalhada das condições geotécnicas de um determinado local (Cerqueira, 2017). Estes dispositivos são capazes de medir e registrar continuamente a pressão hidrostática da água presente nos solos, permitindo o monitoramento quase que em tempo real das variações de nível do lençol freático.

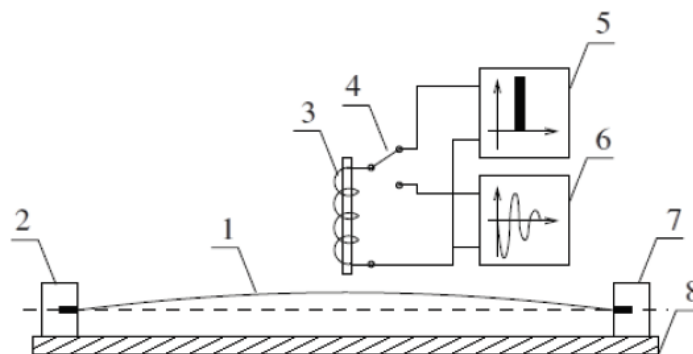
2.4 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS PARA LEITURA DE SENSORES DE CORDA VIBRANTE

Os circuitos de condicionamento de sinais voltados para a leitura de sensores de corda vibrante têm sido objeto de extensa pesquisa ao longo dos anos. De acordo com Mei (2015), os primeiros indícios da utilização de sensores de corda vibrante para o monitoramento de estruturas remontam a 1930, na França.

Os sensores de corda vibrante são compostos (de maneira resumida) por um fio de aço esticado entre dois pontos de ancoragem, fixados na estrutura a ser monitorada, conforme ilustrado no modelo simplificado apresentado na Figura 10. Uma bobina posicionada próxima ao fio é responsável por excitá-lo em ressonância e, posteriormente, detectar sua frequência de vibração. A frequência de ressonância do fio varia de acordo com sua tensão mecânica e, conseqüentemente, com os movimentos relativos das duas ancoragens (Cieplok, Karwowski e Bednarski, 2018).

A fim de garantir a correta leitura dos sensores de corda vibrante, faz-se necessário utilizar circuitos de condicionamento de sinais apropriados. Estes circuitos têm como finalidade amplificar e filtrar o sinal proveniente dos sensores, tornando-o adequado para análise e posterior processamento.

Figura 10 – Modelo simplificado sensor de corda vibrante



Nota: 1 – Corda; 2 – Pontos de ancoragem; 3 – Bobina; 4 – Chave seletora; 5 – Sinal de Entrada; 6 – Sinal de resposta do sensor amortecido.

Fonte: Adaptado de Cieplok, Karwowski e Bednarski (2018).

A leitura dos sensores de corda vibrante é realizada por meio de um circuito especialmente projetado com o objetivo de gerar um processo de excitação elétrica. Este processo envolve a aplicação de um sinal elétrico de frequência controlada ao sensor, utilizando

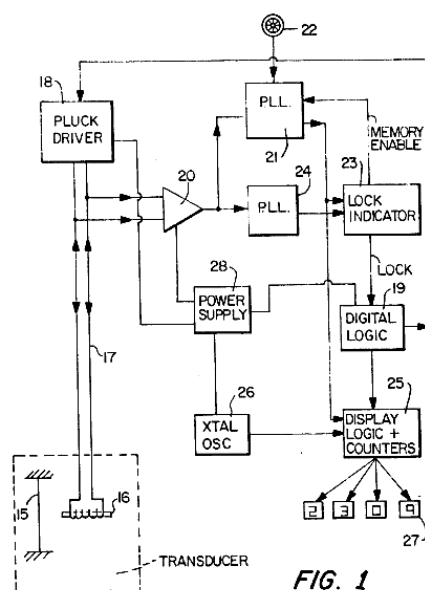
geradores de funções analógicos, circuitos digitais, microcontroladores ou outros dispositivos, conforme ilustrado no destaque 5 da Figura 10.

O circuito de excitação tem a responsabilidade de condicionar o sinal elétrico gerado pelo gerador de funções ou microcontrolador, elevando-o a um nível adequado para excitar o sensor de corda vibrante. Quando a frequência do sinal aplicado se aproxima da frequência natural da corda, o sensor responde retornando um sinal sub-amortecido na sua frequência de vibração, como ilustrado no destaque 6 da Figura 10.

O sinal devolvido pelo sensor é então encaminhado para o circuito de condicionamento de sinais, cuja função é amplificar, filtrar e, em algumas aplicações, converter o sinal analógico gerado pelo sensor em um sinal digital, tornando-o utilizável para processamento e/ou apresentação posteriores.

Um exemplo de dispositivo destinado a realizar a leitura de sensores de corda vibrante foi registrado em uma patente nos Estados Unidos em 1975. Neste dispositivo, a frequência de excitação é ajustada manualmente por um operador até que a frequência de vibração da corda seja detectada pelo circuito de condicionamento de sinais. A frequência detectada é então exibida em um visor, conforme destacado na Figura 11 (item 27). A patente foi registrada pelo inventor William W. Bailey.

Figura 11 – Diagrama Geral do dispositivo destinado a ler instrumentos de corda vibrante patentado em 1975



Fonte: Bailey (1975).

A Figura 11 apresentou um diagrama de blocos dos circuitos do dispositivo patentado por William W. Bailey. A seguir, é fornecida uma descrição sucinta de cada bloco apresentado.

O bloco 15 corresponde à corda de vibração, que é o sensor utilizado para medir a vibração no medidor de fio vibrante. A bobina eletromagnética, representada pelo bloco 16, é um transdutor responsável por enviar uma corrente elétrica através da corda de vibração. Os cabos (bloco 17) são utilizados para conectar o transdutor à placa do medidor de fio vibrante.

O bloco 18 refere-se ao driver de *pluck*, um amplificador que amplifica o sinal gerado pelo gerador de função *digital logic* e o envia para a bobina eletromagnética. A lógica de sequência, identificada pelo bloco 19, é utilizada para controlar a operação do medidor de fio vibrante e executar as etapas necessárias para emitir o sinal e medir a frequência natural da corda de vibração.

O bloco 20 representa o amplificador-detector analógico, responsável por amplificar e detectar o sinal de vibração gerado pela corda de vibração e enviá-lo para a lógica de sequência. O elo de realimentação fechado por fase, *Phase Lock Loop* – PLL (bloco 21), é um circuito de realimentação que mantém a frequência do sinal de saída próxima a uma frequência central controlada pelo operador por meio de um *knob*.

O potenciômetro (bloco 22) é utilizado para ajustar a frequência que será injetada no sensor de corda vibrante. O indicador de travamento (bloco 23) indica se o circuito está em estado de travamento ou sincronização com o sinal de vibração da corda do sensor. O segundo PLL (bloco 24) é fornecido no circuito e trabalha em conjunto com o indicador de travamento.

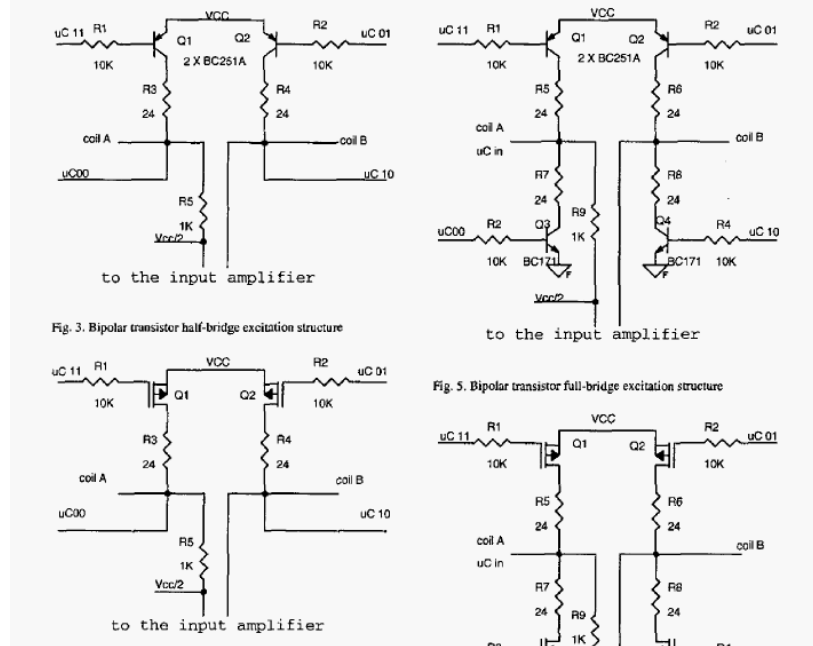
Os contadores de lógica de exibição (bloco 25) são responsáveis por registrar e contar o número de ciclos do sinal de 10 Hz fornecido pelo oscilador. Estes contadores emitem o sinal para que a frequência de vibração da corda seja exibida no *display* (bloco 27), composto por quatro *displays* de sete segmentos.

No dispositivo proposto por William W. Bailey em 1975, o ajuste manual da frequência aplicada ao sensor é necessário para encontrar a frequência de ressonância da corda vibrante. O operador realiza as conexões apropriadas dos cabos do transdutor e, em seguida, utiliza um potenciômetro para variar a frequência do sinal gerado pelo oscilador do dispositivo, que é aplicado no sensor. Ao ajustar a frequência, o objetivo é encontrar a frequência de ressonância desejada no sensor, e o valor correspondente é exibido no display do aparelho, fornecendo ao operador a informação necessária para identificar a frequência de ressonância da corda vibrante do sensor.

Com os avanços tecnológicos das últimas décadas, surgiram dispositivos e abordagens inovadoras para a leitura de transdutores de corda vibrante. Viman, Ciascal, Dabacan e Pop (2004) contribuíram significativamente neste sentido por meio de seu estudo intitulado "*Using an embedded microcontroller system to excite vibrating wire transducers*". Neste trabalho explorou-se o uso de microcontroladores para a excitação desses transdutores, oferecendo uma alternativa ao processo manual proposto por William W. Bailey em 1975 para identificar a frequência de vibração da corda.

No estudo de Viman et al. (2004) foram apresentadas diferentes estruturas de excitação, como a meia ponte e a ponte completa, utilizando transistores bipolares e transistores de efeito de campo (FETs), conforme ilustrado na Figura 12. Estas estruturas permitiram um controle preciso dos sinais de excitação, resultando em medições mais eficientes e precisas das vibrações da corda. Esta abordagem representa um avanço significativo em relação às limitações do método anterior, oferecendo maior praticidade e confiabilidade na identificação das frequências de ressonância.

Figura 12 – Esquemáticos dos circuitos de excitação proposto por Viman *et al.* (2004)



Fonte: Viman *et al.* (2004).

Durante a primeira década dos anos 2000 surgiram dispositivos e abordagens inovadoras para a leitura de transdutores de corda vibrante. Alguns estudos se destacaram neste contexto, contribuindo significativamente para o avanço da tecnologia nesta área.

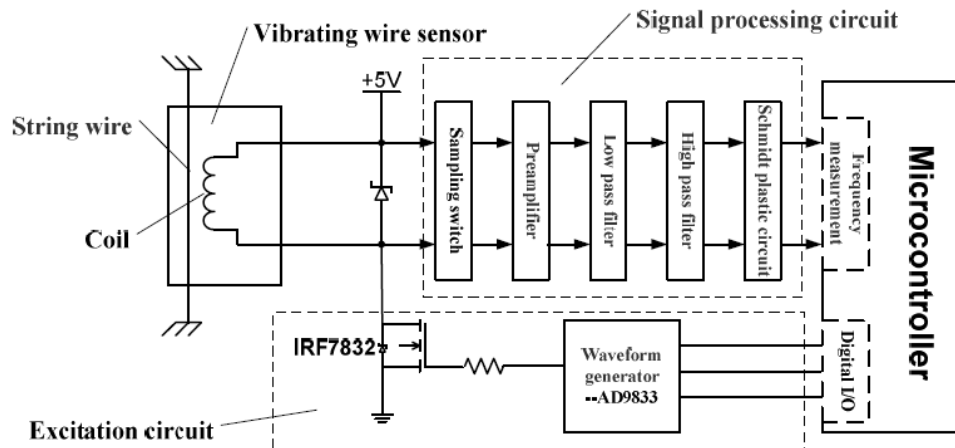
Um desses estudos relevantes foi realizado por Yu e Gupta (2005), intitulado *An efficient model for improving performance of vibrating-wire instruments*, publicado na revista *Measurement*. Os autores propuseram um modelo eficiente implementado por um microcontrolador de 8 bits, que oferecia melhorias no desempenho da excitação e leitura dos instrumentos de corda vibrante. O estudo incluiu a comparação dos resultados processados usando o modelo proposto com os obtidos por um modelo físico elaborado. Esta pesquisa representou um avanço significativo, proporcionando melhorias notáveis em termos de performance (Yu; Gupta, 2005).

Outro trabalho relevante foi conduzido por Kim *et al.* (2007) e intitulado *Development of wireless module for tunnel vibrating wire type sensor*. Neste estudo, os pesquisadores concentraram-se na criação de um módulo sem fio para sensores de corda vibrante utilizados em túneis. A implementação deste módulo permitiu a transmissão remota de dados, eliminando a necessidade de conexões físicas. Esta abordagem proporcionou benefícios significativos em termos de facilidade de instalação e flexibilidade de monitoramento em ambientes complexos. O trabalho de Kim *et al.* (2007) destacou-se ao oferecer uma solução inovadora para o uso de sensores de corda vibrante em aplicações de túneis.

Além destes estudos, outras pesquisas realizadas entre a primeira metade das décadas de 2010 e 2015 contribuíram para o aprimoramento e precisão na leitura de instrumentos de corda vibrante. He et al. (2012), Pop et al. (2013), Kovacs, Mircea e Gyura (2014), Mao, Zhao e Zhou (2014) e Zhu e Zhu (2014) são exemplos destes trabalhos que exploraram novas tecnologias, componentes eletrônicos modernos e algoritmos avançados. A Figura 13 apresenta o diagrama em blocos do dispositivo proposto por He et al. (2012), enquanto a Figura 14 ilustra o diagrama em blocos do dispositivo proposto por Mao, Zhao e Zhou (2014).

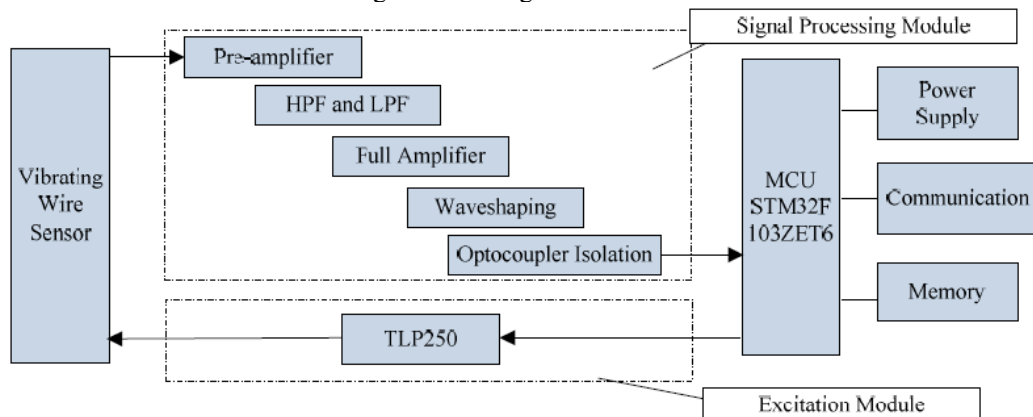
Estes estudos destacados proporcionaram avanços significativos na tecnologia de instrumentos de corda vibrante, trazendo melhorias no desempenho, precisão e aplicabilidade desses dispositivos em diversas áreas de pesquisa e engenharia.

Figura 13 – Diagrama em Blocos



Fonte: He *et al.* (2012).

Figura 14 – Diagrama de blocos



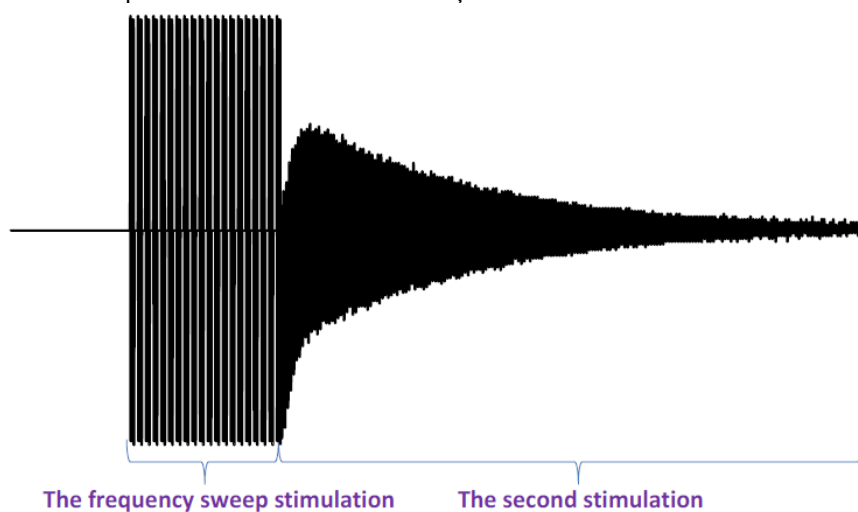
Fonte: Mao *et al.* (2014).

Um aspecto de relevância a ser destacado em relação aos trabalhos previamente mencionados, e aos que serão abordados posteriormente neste estudo, é o uso do arranjo

consolidado e fundamental para dispositivos de leitura de sinais de sensores de corda vibrante. Este arranjo inclui, no mínimo, um circuito de excitação (com um ou mais componentes eletrônicos) e um circuito de condicionamento do sinal fornecido pelo sensor. O circuito de condicionamento consiste, essencialmente, em um amplificador primário ou pré-amplificador, um filtro passa-faixa e um amplificador secundário em algumas aplicações. Por fim, um circuito de disparo (*schmitt trigger*) é utilizado para converter o sinal analógico em um sinal digital.

O amplificador primário ou pré-amplificador desempenha um papel crucial ao amplificar o sinal de ressonância fornecido pelo sensor de corda vibrante. Esses sensores retornam um sinal subamortecido, que apresenta uma taxa de decaimento exponencial e geralmente possui baixa amplitude (entre 2mV e 4mV), conforme ilustrado na Figura 15 extraída do trabalho de Sang e Zhang (2020a). Portanto, é essencial que o amplificador primário possua uma alta capacidade de ganho e baixo ruído, uma vez que um sinal que se caracteriza com uma baixíssima amplitude está sujeito a interferências ambientais e ruídos indesejados.

Figura 15 – Gráfico representando os sinais de excitação e o sinal subamortecido devolvido pelo sensor

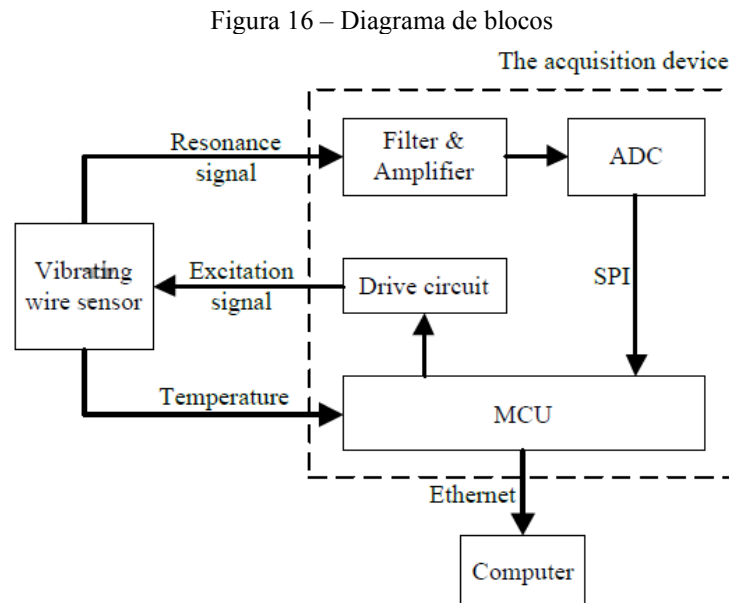


Fonte: Sang e Zhang (2020a).

O filtro passa-faixa desempenha o papel de filtrar o sinal amplificado pelo amplificador primário. As frequências de corte aplicadas a este filtro são definidas de acordo com os sensores de corda vibrante que se pretende ler. Normalmente, os sensores de corda vibrante variam suas frequências dentro de um intervalo entre 350Hz e 4500Hz. No Capítulo 5 deste estudo é apresentada uma tabela com um levantamento realizado para esta pesquisa, contendo o intervalo de frequências dos sensores de corda vibrante de várias marcas.

O amplificador secundário é encontrado em alguns dispositivos desenvolvidos, como nos trabalhos de Kovacs, Mircea e Gyura (2014), Wu *et al.* (2016), Sang e Zhang (2020a) e

Zhu e Zhu (2014). No entanto, em outros trabalhos, como o desenvolvido por Wang e Zhou (2018), não foram identificados amplificadores secundários, conforme mostrado na Figura 16 a seguir. A utilização ou não deste componente é uma decisão de projeto, uma vez que esta escolha depende de vários outros fatores, como custo, disponibilidade de componentes, configuração do circuito, entre outros aspectos específicos.



Fonte: Wu *et al.* (2016).

Na segunda metade da década de 2015 até 2021 foi observada uma crescente tendência de incorporação de sistemas de transmissão automática de dados sem fio (wireless) nos dispositivos desenvolvidos para a leitura de instrumentos de corda vibrante. Embora algumas iniciativas de utilização desta tecnologia wireless já tenham sido identificadas antes de 2015, como nos trabalhos de Lee *et al.* (2010) e Kim *et al.* (2007), foi durante essa segunda metade da década que ocorreu a verdadeira expansão desse conceito nos dispositivos desenvolvidos.

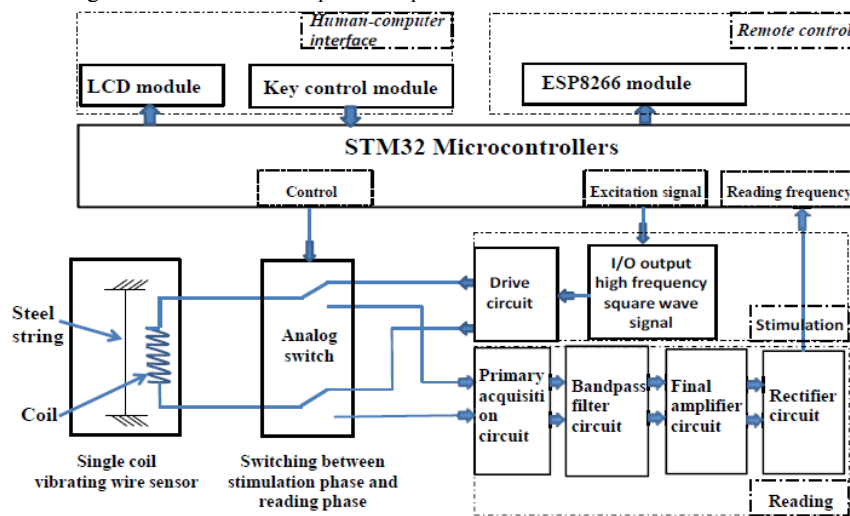
Os dispositivos desenvolvidos por Hu, J. *et al.* (2021), Mishra *et al.* (2017), Sattler *et al.* (2020), Sang e Zhang (2020a) e Wu *et al.* (2016), buscaram melhorias na precisão da leitura dos sensores de corda vibrante por meio de aprimoramentos nos circuitos de condicionamento de sinais, algoritmos de geração de sinal de excitação, entre outras iniciativas. Todos estes dispositivos foram elaborados com a incorporação de sistemas de transmissão automática de dados sem fio (wireless).

A Figura 17 apresenta o diagrama de blocos do dispositivo desenvolvido por Sang e Zhang (2020a), que merece destaque por utilizar dois microcontroladores. O STM32F103ZET6

é responsável pela interface direta com os circuitos de excitação e condicionamento de sinais, os quais estão conectados diretamente ao sensor de corda vibrante.

Além disto, este dispositivo faz uso de um módulo que contém o microcontrolador (embarcado) ESP8266 para conexões remotas. O ESP8266 possui recursos embutidos de *Wi-Fi* e *Bluetooth*, além de diversos outros protocolos de comunicação disponíveis. As características técnicas detalhadas do STM32 e do ESP8266 são abordadas no Capítulo 3, item 3.1.2 deste estudo.

Figura 17 – Diagrama de blocos dos dispositivos para ler sensores de corda vibrante e conexões remotas



Fonte: Sang e Zhang (2020a).

Após fornecer uma visão geral abrangente dos dispositivos desenvolvidos para a leitura de instrumentos de corda vibrante ao longo do tempo, o foco agora recai sobre os resultados obtidos e os critérios de aceitação adotados por esses estudos. Serão exploradas as avaliações e os testes realizados para validar o desempenho e a precisão dos dispositivos desenvolvidos, fornecendo uma compreensão da eficácia e confiabilidade dessas tecnologias, além de estabelecer critérios de avaliação para o dispositivo desenvolvido neste estudo.

Destaca-se o trabalho intitulado *Acquisition System Based on the STM32* (Zhu & Zhu, 2014) pelos resultados alcançados. Para validar a solução proposta foram conduzidos diversos testes. No contexto deste estudo específico, o piezômetro de corda vibrante Geokon, modelo 4500SR, foi utilizado. O primeiro teste consistiu em avaliar a resposta em frequência deste piezômetro em condições de laboratório, com temperatura ambiente de 25,5°C e uma profundidade de água de 30 cm em um gabarito de teste. Foram realizadas 25 (vinte e cinco) leituras consecutivas nestas mesmas condições. Os dados apresentados por Zhu & Zhu (2014)

revelaram um desvio padrão calculado igual a 0,02, o qual, de acordo com os autores, atende aos critérios de engenharia estabelecidos.

A Tabela 4 a seguir apresenta os resultados obtidos no teste realizado por Zhu & Zhu (2014), na qual a coluna "n" indica o índice da leitura realizada, a coluna "Frequência-Hz" representa as leituras obtidas pelo dispositivo desenvolvido ao ler o instrumento 4500SR da Geokon, e a coluna "d" representa a diferença entre a leitura atual e a média das leituras.

Tabela 4 – Resultado do primeiro teste realizado em laboratório do dispositivo desenvolvido por Zhu e Zhu (2014)

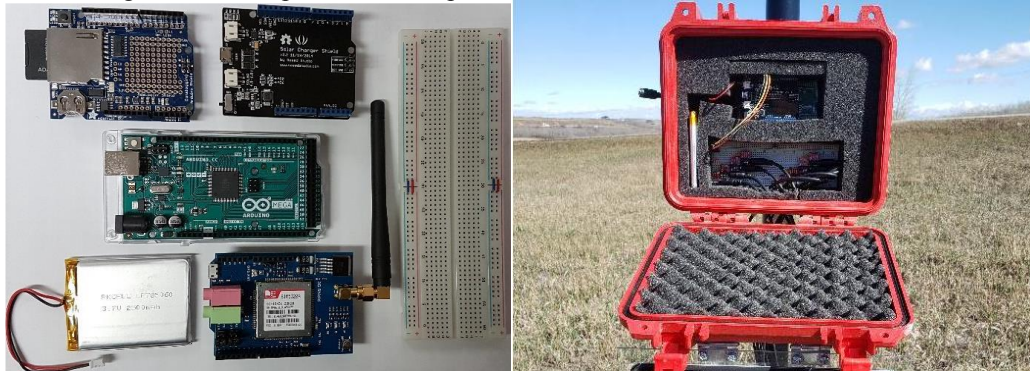
n	Frequência (Hz)	d
1	2909,62	-0,027
2	2909,65	0,003
3	2909,64	-0,007
4	2909,67	0,023
5	2909,65	0,003
6	2909,65	0,003
7	2909,68	0,033
8	2909,68	0,033
9	2909,64	-0,007
10	2909,64	-0,007
11	2909,63	-0,017
12	2909,65	0,003
13	2909,62	-0,027
14	2909,68	0,033
15	2909,62	-0,027
16	2909,63	-0,017
17	2909,65	0,003
18	2909,68	0,033
19	2909,65	0,003
20	2909,62	-0,027
21	2909,69	0,043
22	2909,58	-0,067
23	2909,72	0,073
24	2909,66	0,013
25	2909,63	-0,017

Fonte: Zhu; Zhu (2014).

Um artigo que merece destaque pelos resultados obtidos é o trabalho intitulado *Field Application Of Inexpensive Custom-built Programmable Dataloggers For Routine Instrumentation Needs* de Sattler *et al.* (2020). Neste estudo, um Arduino Mega foi utilizado

para desenvolver um dispositivo destinado à leitura de instrumentos de corda vibrante. Os componentes do dispositivo e o protótipo instalado em campo são elucidados na Figura 18 abaixo.

Figura 18 – Componentes do dispositivo desenvolvido por Sattler *et al.* (2020)



Fonte: Sattler *et al.* (2020).

No experimento conduzido por Sattler *et al.* (2020) realizou-se uma comparação entre o processamento de sinal de um sistema de registro de dados de baixo custo e um registrador de dados comercial, *Slope Indicator VW data recorder*, a fim de investigar a precisão das medições. Para tal propósito, uma câmara de pressão de PVC com capacidade de 2000 kPa foi montada em um ambiente de laboratório. O objetivo do experimento consistiu em avaliar o desempenho dos dois sistemas em condições de pressão elevada, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Imagem representando os componentes utilizados nos testes feitos por Sattler *et al.* (2020) - Câmara de pressão, unidade de leitura comercial e registrador de dados de baixo custo que foi elaborado

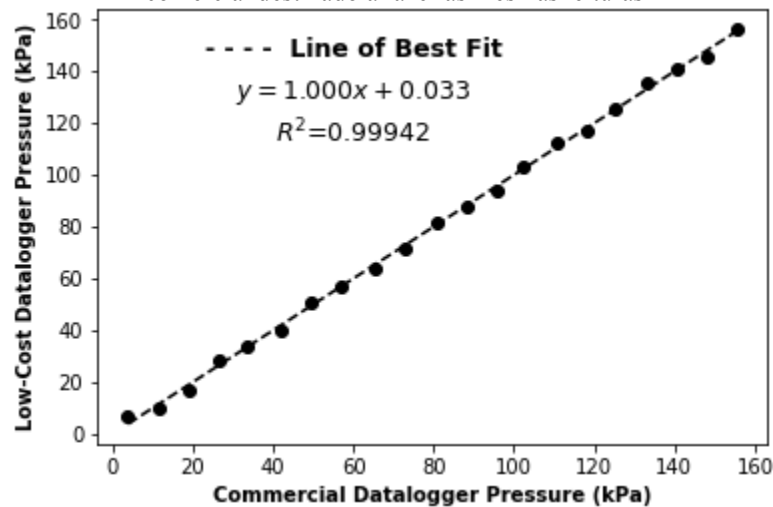


Fonte: Sattler *et al.* (2020).

No interior da câmara de pressão, os pesquisadores selaram um piezômetro do modelo VW2100 e preencheram a câmara com água. Utilizando um controlador pressão-volume (PV), incrementaram gradualmente a pressão dentro da câmara em aproximadamente 10 kPa, mantendo-a constante em cada incremento. Tanto o registrador de dados de baixo custo quanto o registrador de dados convencional foram conectados ao piezômetro de corda vibrante em cada nível de pressão, permitindo a realização de leituras de pressão.

Os resultados obtidos por Sattler *et al.* (2020) demonstraram uma alta correlação entre a unidade de leitura comercial e o registrador de dados de baixo custo, validando assim as medições realizadas pelo registrador de baixo custo. A Figura 20 apresenta os resultados desta comparação entre os dois sistemas, evidenciando a capacidade do sistema de baixo custo em fornecer medições precisas e confiáveis.

Figura 20 – Comparação entre as leituras do dispositivo desenvolvido por Sattler *et al.* (2020) e um dispositivo comercial destinado a fazer as mesmas leituras



Fonte: Sattler *et al.* (2020).

Com base nas informações abordadas neste capítulo, é possível inferir que o estudo relacionado aos dispositivos utilizados para leitura de sensores de corda vibrante apresenta uma amplitude significativa, contemplando uma extensa variedade de trabalhos desenvolvidos ao longo dos anos. A pesquisa nesta área continua em constante evolução, visando aprimorar tanto a viabilidade econômica quanto a eficiência técnica destes sistemas. Estes esforços são direcionados para a melhoria da precisão e confiabilidade das medições, bem como para a facilitação da implementação dessas tecnologias em diversas aplicações da engenharia.

Os conhecimentos adquiridos por meio desta investigação serviram como fundamento para o desenvolvimento do dispositivo abordado neste estudo. Além disto, os métodos de validação empregados nos dispositivos mencionados foram utilizados como referência para a validação do sistema desenvolvido neste trabalho. Os resultados obtidos desempenham um papel fundamental no avanço e aperfeiçoamento dessas soluções, fornecendo uma base sólida para pesquisas futuras e aplicações práticas.

2.5 TESTE DE EQUALIZAÇÃO EM PIEZÔMETROS *STANDPIPE* (TUBO ABERTO)

Os testes de equalização realizados em piezômetros do tipo *standpipe* têm como objetivo principal verificar o funcionamento adequado destes instrumentos. Estes testes consistem em ensaios de permeabilidade realizados em campo, que fornecem informações sobre a permeabilidade do solo no local de instalação do piezômetro. A permeabilidade, também conhecida como condutividade hidráulica, refere-se à capacidade do solo permitir a passagem de água e é expressa numericamente pelo coeficiente de permeabilidade "k".

A permeabilidade do solo é uma propriedade geotécnica que possui uma ampla gama de valores e alta variabilidade, sendo influenciada por diversos fatores, como índice de vazios, temperatura, estrutura do solo, peso específico, grau de saturação e topografia estratificada.

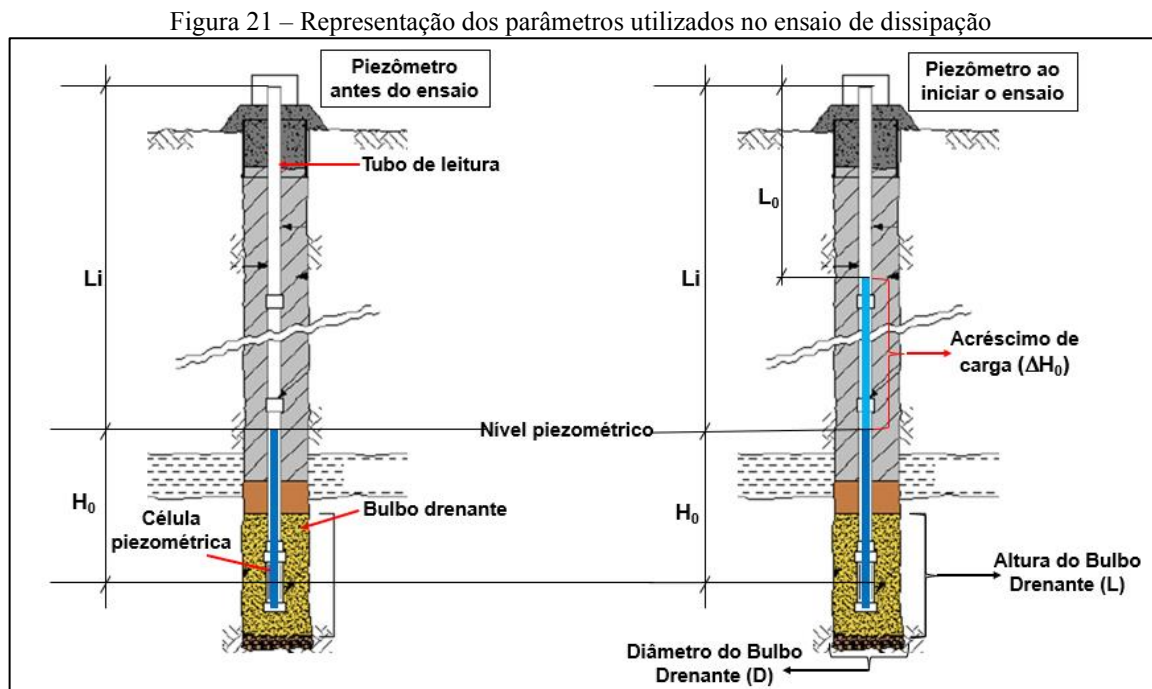
Conforme mencionado por Kamp (2001), os testes de equalização, também conhecidos como "testes de vida" ou "testes de resposta", são ferramentas essenciais para estudar a permeabilidade de rochas e solos, bem como para determinar mecanismos de infiltração. Estes testes são considerados relativamente simples de serem realizados e analisados. Segundo o autor, o teste de equalização deve ser realizado em todos os casos para verificar se o piezômetro é suficientemente sensível para detectar poropressões transitórias em locais com regime de fluxo permanente.

Existem vários tipos de ensaios para determinação da permeabilidade *in situ*, como abordado por Fantinatti (2002). No entanto, os ensaios de equalização por dissipação são frequentemente utilizados em barragens devido à sua facilidade de execução.

No teste de equalização por dissipação, são seguidos os seguintes passos:

1. Realização da leitura inicial “ L_i ” do nível de água dentro do tubo do piezômetro e determinação da carga piezométrica inicial H_0 ;
2. Aplicação do acréscimo máximo de carga hidráulica inicial “ ΔH_0 ” preenchendo parcial ou totalmente o tubo de leituras, seguido pela leitura “ L_0 ” no tempo “ t_0 ” = 0;
3. Realização de leituras crescentes “ L ” dos níveis de água em queda dentro do tubo, até a estabilização. Os intervalos de tempo típicos para as leituras são “ t_1 ” = 30 s, “ t_2 ” = 1 min, “ t_3 ” = 2 min, “ t_4 ” = 4 min, “ t_5 ” = 8 min, “ t_6 ” = 15 min, “ t_7 ” = 30 min, “ t_8 ” = 1 h, “ t_9 ” = 2 h, (“ t_{10} ” = 4 h e “ t_{11} ” = 8 h, se necessário dependendo da permeabilidade do solo onde o piezômetro está instalado).

A Figura 21 apresenta as representações das variáveis utilizadas no processo de ensaio de equalização por dissipação.



Fonte: Modificado de Cerqueira (2017).

Ao determinar o acréscimo de carga necessário para o ensaio em um piezômetro, é importante considerar o fenômeno de fraturamento hidráulico induzido pela aplicação de carga. De acordo com a **teoria da mecânica dos solos**, a fratura hidráulica ocorre quando a pressão

hidrostática “ σ ” desenvolvida no bulbo drenante do piezômetro atinge um valor crítico “ σ_c ”, que pode ser calculado pela Equação (2.3), e excede a menor das tensões totais, às quais o bulbo drenante está sujeito devido às tensões provenientes do aterro compactado, tanto na direção vertical “ σ_v ” quanto na horizontal “ σ_h ”. A Figura 22 ilustra as tensões mencionadas em um bulbo drenante de um piezômetro instalado em um aterro compactado, como é o caso de barragens.

$$\sigma_c = (H_o + \Delta H_c) \times \gamma_w \quad (2.3)$$

Onde:

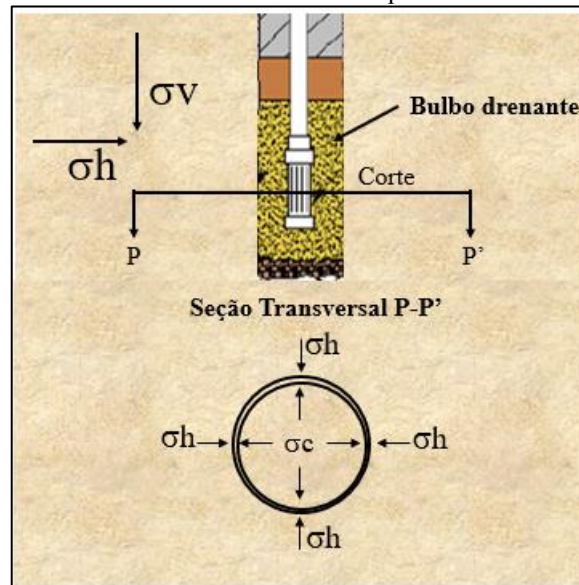
σ_c – Tensão crítica (kPa);

H_o – Carga piezométrica inicial antes do ensaio (m.c.a);

ΔH_c – Acréscimo de carga crítico (m.c.a);

γ_w – peso específico da água (kN/m³).

Figura 22 – Representação das tensões em um bulbo drenante de um piezômetro instalado em aterro compactado



Fonte: Modificado de Cerqueira (2017).

Em uma abordagem simplificada, no âmbito dos estudos de engenharia, são reconhecidos dois tipos de fratura hidráulica em aterros ou fundações: o fraturamento horizontal, ocorrente quando a tensão horizontal “ σ_h ” é maior do que a tensão vertical “ σ_v ”, e o fraturamento vertical, que se manifesta quando a tensão horizontal “ σ_h ” é menor do que a tensão vertical “ σ_v ”. Estes fenômenos são observados, respectivamente, em solos pré-adensados e solos normalmente adensados.

Considerando que as barragens de terra são constituídas por aterros compactados, nos quais os solos geralmente apresentam adensamento, é esperado que os piezômetros instalados nestas barragens e submetidos a testes de dissipação estejam sujeitos a fraturas hidráulicas verticais.

Para que ocorra uma fratura hidráulica vertical, é necessário que se satisfaça a igualdade apresentada nas Equações (2.4, 2.5 e 2.6).

$$\sigma_c = \sigma_h \quad (2.4)$$

Onde:

$$\sigma_c = (H_o + \Delta H_c) \times \gamma_w \quad (2.5)$$

Logo:

$$(H_o + \Delta H_c) \times \gamma_w = \sigma_h \quad (2.6)$$

Para os cálculos serem efetivos, os termos de tensões devem ser expressões em tensões efetivas, cujo cálculo é apresentado a seguir na equação (2.7).

$$\sigma'_h = \sigma_h - H_o \times \gamma_w \quad (2.7)$$

Onde:

σ'_h – Tensão efetiva horizontal (kPa);

σ_h – Tensão total horizontal (kPa);

H_o – Carga piezométrica inicial antes do ensaio(m.c.a);

γ_w – Peso específico da água (kN/m³).

Deste modo, tem-se:

$$\Delta H_c \times \gamma_w = \sigma'_h \quad (2.8)$$

O coeficiente de empuxo em repouso (K_o') é um fator crucial na determinação da carga adicional aplicada aos piezômetros durante o ensaio de dissipação. Este coeficiente está relacionado às tensões horizontais efetivas (σ'_h) e às tensões verticais efetivas (σ'_v), conforme expresso na Equação (2.9) a seguir.

$$K_o' = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \quad (2.9)$$

Manipulando as equações apresentadas obtém-se:

$$\sigma' h = K o' x \sigma' v \quad (2.10)$$

De maneira análoga:

$$\Delta H c x \gamma w = K o' x \sigma' v \quad (2.11)$$

Por fim, é estabelecida a Equação (2.12) como a relação utilizada para determinar o acréscimo de carga necessário para provocar o fraturamento hidráulico durante os ensaios de dissipação em piezômetros.

$$\frac{\Delta H c x \gamma w}{\sigma' v} = K o' \quad (2.12)$$

Desta forma, nos ensaios de dissipação realizados em piezômetros do tipo *standpipe* instalados em barragens, ocorre o fraturamento hidráulico quando um acréscimo de carga, representado por “ $\Delta H c$ ”, é aplicado internamente na célula, de modo que a relação $\Delta H c \cdot \gamma w / \sigma' v$ se iguale ao coeficiente de empuxo “ $K'o$ ”.

O coeficiente de empuxo em repouso, “ $K'o$ ”, é um parâmetro fundamental que pode ser diretamente medido em laboratório ou por meio de ensaios de campo. Para sua determinação em laboratório, o ensaio mais comumente utilizado é o ensaio de determinação do coeficiente de empuxo em repouso, enquanto em campo podem ser empregados ensaios como pressiômetros, *Gloetzl Cell*, CPTU, entre outros.

Normalmente, o coeficiente de empuxo em repouso, “ $K'o$ ”, pode ser estimado utilizando o ângulo de atrito efetivo do solo, “ ϕ ”, obtido por meio de ensaios de cisalhamento direto ou triaxiais, utilizando a seguinte equação (2.13):

$$K'o = 0,95 - \text{seno } \phi \quad (2.13)$$

Para determinar a tensão efetiva vertical, “ $\sigma'v$ ”, é necessário levar em consideração as tensões verticais geostáticas, as quais podem ser calculadas utilizando a equação (2.14) a seguir.

A equação (2.14) é utilizada para estimar as tensões verticais geostáticas e é dada por:

$$\sigma' v = \gamma n . L + \gamma \text{sat} x H o - \gamma w x H o \quad (2.14)$$

A saber:

- $\sigma'v$ – Tensão efetiva vertical - (kPa);
- γ_n – Peso específico do solo natural - (kN/m³);
- L – Comprimento do tubo seco - (m);
- γ_{sat} – Densidade do solo saturado - (kN/m³);
- H_o – Carga piezométrica inicial antes do ensaio(m.c.a);
- γ_w – Densidade da água - (kN/m³).

É relevante salientar que a existência de arqueamento ou concentração de tensões em aterros de barragens pode afetar os valores da tensão vertical geostática no local do piezômetro. O arqueamento é caracterizado pela curvatura da superfície do aterro para fora da barragem, enquanto a concentração de tensões ocorre em áreas onde a pressão hidrostática é maior que a média.

Nestes casos, para determinar “ $\sigma'v$ ” é importante considerar outras formas de medição de tensão, como a modelagem numérica. A modelagem numérica utiliza softwares especializados para simular o comportamento da barragem, identificando áreas com concentração de tensões ou possíveis ocorrências de arqueamento. Além disto, a modelagem numérica pode estimar os valores de tensão em locais onde não há instrumentação disponível.

É válido ressaltar que a modelagem numérica é uma técnica complexa, exigindo conhecimento especializado e cautela para garantir a precisão dos resultados. Portanto, é recomendável validar os resultados obtidos por meio da modelagem com medições *in situ*, sempre que possível.

De qualquer forma, ao obter os parâmetros de forma confiável, a determinação do acréscimo máximo de carga a ser aplicado no piezômetro durante o ensaio de dissipação deve satisfazer a seguinte relação apresentada na Equação (2.15).

$$\Delta H_o < \Delta H_c \quad (2.15)$$

Analogamente:

$$\Delta H_o < K'_{o'} \times \frac{\sigma' h}{\gamma_w} \quad (2.16)$$

Após a determinação de “ ΔH_o ” e considerando que os piezômetros *standpipe* são compostos por tubos de PVC, o cálculo do volume de água a ser adicionado no piezômetro, a

fim de atingir o acréscimo de carga necessário para a realização do ensaio, requer a utilização da equação (2.17) apresentada a seguir.

$$V = \Delta H \times A \quad (2.17)$$

Onde:

V – Volume de água a ser adicionado no piezômetro para realização do ensaio (L);

ΔH_o – Acréscimo de carga para realização do ensaio (m.c.a);

A – Área da seção transversal do tubo de leitura(m²).

Após a obtenção do volume do acréscimo de carga, é possível realizar a inserção dessa carga no piezômetro a ser ensaiado e efetuar as medições do nível d'água no tubo nos tempos indicados como parte do terceiro passo do ensaio de dissipação.

Por meio dos cálculos apresentados a seguir, é possível determinar o coeficiente de permeabilidade “K”.

Conforme elucidado por Fantinatti (2002), existem diversos métodos disponíveis para a determinação do coeficiente de permeabilidade *in situ*. Neste estudo será adotado o **método de Hvorslev**, proposto por M. J. Hvorslev em 1951, intitulado *Time-lag and soil permeability in ground-water observations*. Este método é amplamente utilizado na engenharia geotécnica devido à sua consolidação e considera as seguintes premissas:

- Solo homogêneo e isotrópico de extensão infinita;
- Comportamento do solo como incompressível, sem ocorrer adensamento ou expansão;
- Consideração de água e tubos de leitura como incompressíveis;
- Validade da **lei de Darcy**;
- Ausência de variação do nível piezométrico do solo durante a aplicação dos excessos de carga ΔH_o no ensaio.

Portanto, para determinar o coeficiente de permeabilidade “K” utilizando o **método de Hvorslev**, é necessário empregar a equação (2.18) destacada a seguir.

$$K = \frac{V_o}{F \times T \times \Delta H_o} = \frac{A \times \Delta H_o}{F \times T \times \Delta H_o} = \frac{A}{F \times T} \quad (2.18)$$

O volume de escoamento V_o é definido como o volume que flui através do bulbo drenante do piezômetro durante o ensaio de dissipação, com o objetivo de igualar as pressões

entre o interior da célula (devido à aplicação do acréscimo de carga “ ΔH_o ”) e a pressão neutra externa à célula, sendo também conhecido como volume de sobrecarga. A área da seção transversal do tubo de leitura é representada por A , enquanto o fator de forma “ F ” é determinado pela forma, dimensões e superfície de drenagem do bulbo, bem como sua posição em relação a possíveis camadas impermeáveis.

No caso de cavidades drenantes cilíndricas em solos homogêneos, como os piezômetros instalados em barragens, o fator de forma pode ser calculado utilizando a equação (2.19) a seguir:

$$F = \frac{2\pi Lb}{\ln \left[\frac{Lb}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{Lb}{D} \right)^2} \right]} \quad (2.19)$$

Onde:

Lb – Altura do bulbo drenante (m);

D – Diâmetro do bulbo drenante (mm);

Um termo importante utilizado no **método de Hvorslev** é o tempo de retardo básico, denotado como “ T ”, conforme apresentado na Equação (2.18). Este tempo representa o ponto em que “ $\Delta H/\Delta H_o$ ” = 0,37 em um gráfico plotado com “ $\Delta H/\Delta H_o$ ” no eixo y (escala logarítmica) e tempo no eixo x (escala linear). Portanto, o tempo de retardo básico “ T ” corresponde à porcentagem de equalização de 63% do acréscimo de carga ΔH_o aplicado.

Por fim, comparando os coeficientes de permeabilidade obtidos nos ensaios com os coeficientes disponíveis ou admissíveis para os materiais ao redor do bulbo drenante do instrumento, é possível avaliar se o piezômetro está funcionando corretamente ou não. E uma alternativa empírica para avaliar a eficiência de um piezômetro *standpipe* é realizar testes de dissipação em momentos distintos. Caso haja uma deterioração significativa na dissipação em relação a um ensaio prévio, isso indica que o instrumento se deteriorou.

Os conceitos apresentados neste capítulo são de extrema importância para o presente trabalho, uma vez que o sistema projetado tem a função de semiautomatizar os ensaios de dissipação em piezômetros. O sistema é capaz de realizar todas as verificações e cálculos de maneira automática, exigindo apenas que um operador insira o volume de água indicado e os parâmetros de entrada necessários para os cálculos. Ao final do ensaio, o sistema plota os gráficos necessários, realiza a análise comparando os valores de permeabilidade e gera um diagnóstico do piezômetro.

Por fim, na ausência de parâmetros de referência para avaliar o desempenho de um piezômetro, o sistema utiliza a opção de comparar curvas de ensaios anteriores para detectar variações ao longo do tempo. No entanto, é importante destacar que esta abordagem deve ser considerada como uma medida temporária, e a busca por parâmetros mais precisos deve ser realizada para garantir uma análise completa e confiável do desempenho do piezômetro pelo sistema.

2.6 INTERNET DAS COISAS

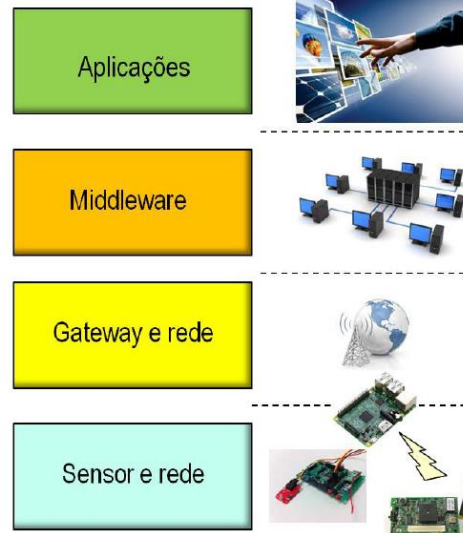
De acordo com Atzori, Iera e Morabito (2010), a Internet das Coisas (*IoT*) pode ser definida como um ecossistema de objetos físicos conectados à internet que são capazes de coletar e compartilhar informações. O uso da *IoT* tem se expandido em diversas áreas, como agricultura, indústria, saúde e edifícios inteligentes. Verma *et al.* (2019) afirmam que a *IoT* desempenha um papel fundamental na criação de edifícios inteligentes, possibilitando a coleta de dados em tempo real para monitorar e controlar o consumo de energia, a segurança e a manutenção predial.

Conforme mencionado por Lin *et al.* (2017), a *IoT* tem o potencial de transformar vários setores, incluindo indústria, agricultura, saúde e transporte. O capítulo introdutório do curso "Conectando Coisas - *IoT*" da CISCO Networking Academy destaca que a *IoT* está presente em diversas áreas da vida cotidiana, desde dispositivos domésticos inteligentes até sistemas de transporte inteligentes e tem o potencial de melhorar a eficiência, economizar recursos e aumentar a qualidade de vida das pessoas.

Tanto Lin *et al.* (2017) quanto Carissimi (2016) propõem uma arquitetura da *IoT* composta por quatro camadas, embora os nomes dados a cada camada sejam diferentes. A camada de percepção, proposta por Lin *et al.*, equivale à camada de sensores e rede, proposta por Carissimi, ambas responsáveis pela coleta de dados. A camada de rede, proposta por Lin *et al.*, é representada pela camada de gateway e rede, proposta por Carissimi, que realiza a conexão entre os dispositivos *IoT* e a internet. A camada de processamento, proposta por Lin *et al.*, é representada pela camada de middleware, proposta por Carissimi, responsável pelo processamento e armazenamento dos dados coletados, além da comunicação entre as camadas. Por fim, a camada de aplicação, proposta por Lin *et al.*, é equivalente à camada de aplicações, proposta por Carissimi, ambas responsáveis por disponibilizar os dados processados para o usuário final.

A Figura 23 ilustra as camadas propostas por Carissimi (2016). É importante destacar que, apesar dos nomes distintos nos dois trabalhos citados, as camadas representam, essencialmente, semelhantes estruturas com a mesma finalidade na arquitetura da IoT.

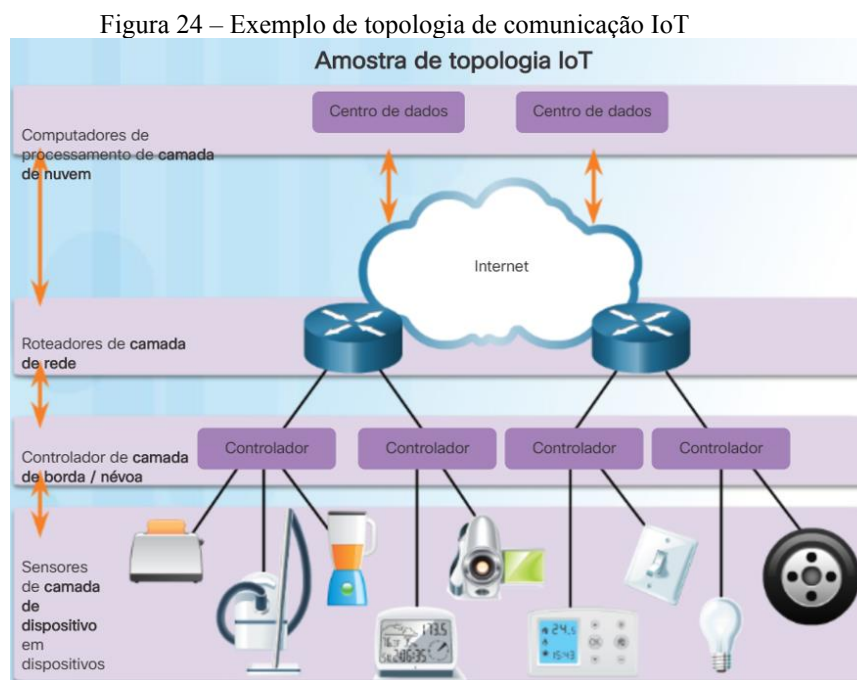
Figura 23 – Quatro camadas da arquitetura IoT



Fonte: Modificado de Carissimi (2016).

O advento da Internet das Coisas (IoT) tem promovido uma transformação na forma como os dispositivos são conectados e trocam informações, viabilizando a interconexão e comunicação autônoma de objetos físicos, como sensores, eletrodomésticos, automóveis e máquinas, por meio de uma rede. Este avanço tecnológico é possibilitado pelo uso de componentes como sensores, atuadores, redes de comunicação e sistemas embarcados, entre outros (Atzori; Iera; Morabito, 2010).

A Figura 24 apresenta uma possível topologia IoT proposta pela Cisco NetAcad, que ilustra a conexão de diversos tipos de dispositivos à rede, permitindo a geração e o controle de dados por meio da internet.



A arquitetura de comunicação em camadas proposta pela Cisco NetAcad para a Internet das Coisas (IoT) abrange cinco camadas distintas: camada de dispositivo, camada de borda/névoa, camada de rede, camada de nuvem e camada de aplicação. Cada camada desempenha funções específicas que trabalham de forma colaborativa para permitir uma comunicação eficiente e a troca de dados entre dispositivos IoT.

A camada de dispositivo é a mais próxima dos dispositivos IoT e tem a responsabilidade de capturar, processar e armazenar dados localmente. Ela abrange a coleta de informações provenientes de sensores e atuadores, além de seu processamento e armazenamento em dispositivos como microcontroladores, microprocessadores e gateways. Considerando as limitações de recursos desses dispositivos, tais como capacidade de processamento, armazenamento e consumo de energia, é fundamental uma avaliação criteriosa para a escolha dos componentes utilizados nas soluções (Cisco NetAcad).

A camada de borda/névoa tem como função o processamento em tempo real e a tomada de decisões próximas aos dispositivos, antes mesmo do envio das informações para a nuvem. Esta camada envolve dispositivos como gateways inteligentes, que agrupam dados provenientes de dispositivos próximos e realizam o processamento local para reduzir a carga na rede e melhorar a latência. A implementação da borda/névoa permite a tomada de decisões em tempo real e aprimora a eficiência e a eficácia da comunicação (Cisco NetAcad).

A camada de rede tem a responsabilidade de proporcionar a conectividade entre os dispositivos IoT e viabilizar a comunicação de dados. Esta camada engloba protocolos de

comunicação, como Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, LoRaWAN, NB-IoT, MQTT, entre outros. A escolha adequada do protocolo depende do contexto e dos requisitos de comunicação, sendo essencial selecionar o protocolo correto para otimizar a comunicação e minimizar o consumo de energia (Cisco NetAcad).

A camada de nuvem é responsável pelo armazenamento, processamento e análise de grandes volumes de dados. Nesta camada estão incluídos provedores de serviços em nuvem, como AWS, Azure e Google Cloud, que disponibilizam serviços de armazenamento, processamento, análise de dados, além de serviços de aprendizado de máquina e inteligência artificial. Esta infraestrutura em nuvem possibilita o desenvolvimento de aplicações de IoT mais sofisticadas (Cisco NetAcad).

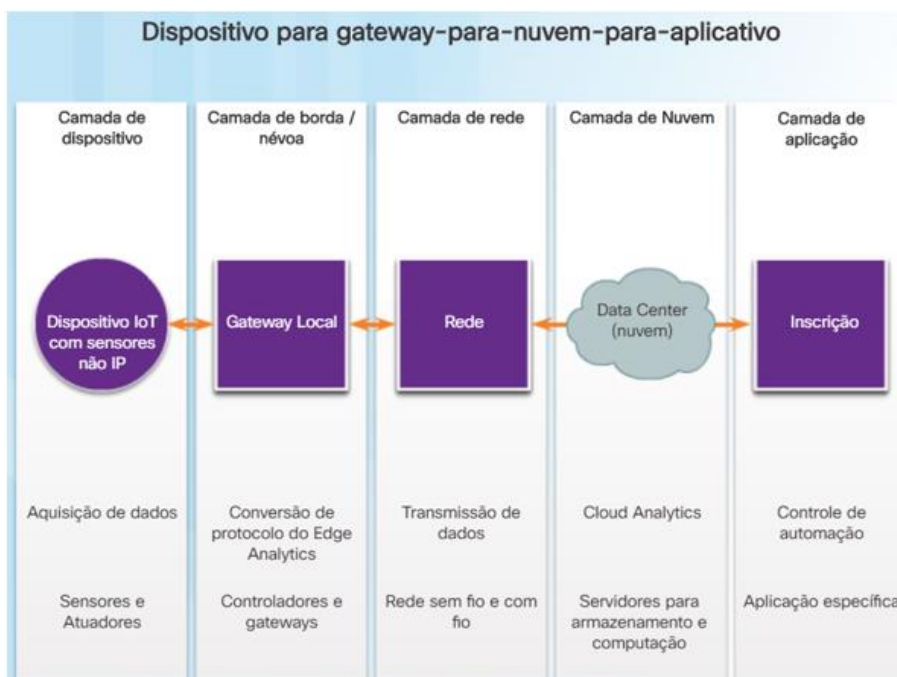
Por fim, a camada de aplicação tem como finalidade oferecer serviços e aplicações para o usuário final. Ela engloba aplicativos móveis, painéis de controle, sistemas de monitoramento e controle, entre outros. Estes aplicativos permitem que os usuários monitorem, controlem e interajam com os dispositivos IoT, tornando a IoT mais acessível e fácil de ser utilizada (Cisco NetAcad).

Em resumo, as camadas de comunicação IoT trabalham de forma integrada para viabilizar a comunicação e a troca de dados eficiente entre dispositivos IoT. Cada camada desempenha funções específicas e é otimizada para atender a diferentes requisitos. É fundamental compreender o papel de cada camada e sua interação para a criação de soluções de IoT eficientes e confiáveis.

Lin *et al.* (2017) e Carissimi (2016) apresentam uma arquitetura da IoT composta por quatro camadas, com funções semelhantes às das cinco camadas propostas pela Cisco NetAcad. A camada de percepção ou sensor corresponde à coleta de dados, a camada de rede se refere à conexão entre dispositivos e à Internet, a camada de processamento/middleware é responsável pelo processamento, armazenamento e comunicação entre as camadas, e a camada de aplicação tem a responsabilidade de disponibilizar os dados para o usuário final. A Cisco NetAcad acrescenta a camada de borda/névoa, que é responsável pelo processamento em tempo real e pela tomada de decisões próximas aos dispositivos, antes mesmo do envio das informações para a nuvem. Além disto, a Cisco NetAcad destaca a importância da camada de nuvem para o armazenamento, processamento e análise de grandes volumes de dados, bem como a camada de aplicação para fornecer serviços e aplicações ao usuário final (Carissimi, 2016; Lin *et al.*, 2017).

A seguir na Figura 25 são apresentadas as 5 camadas IoT propostas pela Cisco NetAcad.

Figura 25 – Cinco Camadas IoT Cisco



Fonte: Cisco NetAcad (www.netacad.com).

Com base nas informações apresentadas anteriormente, constata-se que a Internet das Coisas (IoT) constitui um ecossistema em que objetos físicos conectados à internet coletam e compartilham informações, abrangendo diversos domínios, como agricultura, indústria, saúde e edifícios inteligentes (Atzori; Iera; Morabito, 2010). Dentro deste contexto, o protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) desempenha um papel essencial na troca de dados entre dispositivos IoT, proporcionando uma comunicação eficiente e escalável.

Especificamente no contexto de edifícios inteligentes, o MQTT é de relevância significativa, permitindo a coleta de dados em tempo real para monitorar e controlar o consumo de energia, a segurança e a manutenção predial (Verma *et al.*, 2019). Ademais, sua aplicabilidade se estende a diversos setores, como indústria, agricultura, saúde e transporte, impulsionando a transformação dessas áreas (Lin *et al.*, 2017).

No que se refere à arquitetura proposta por Lin *et al.* (2017) e Carissimi (2016) para a IoT, o MQTT está inserido na camada de comunicação, responsável por viabilizar a conectividade entre dispositivos e possibilitar a troca de dados.

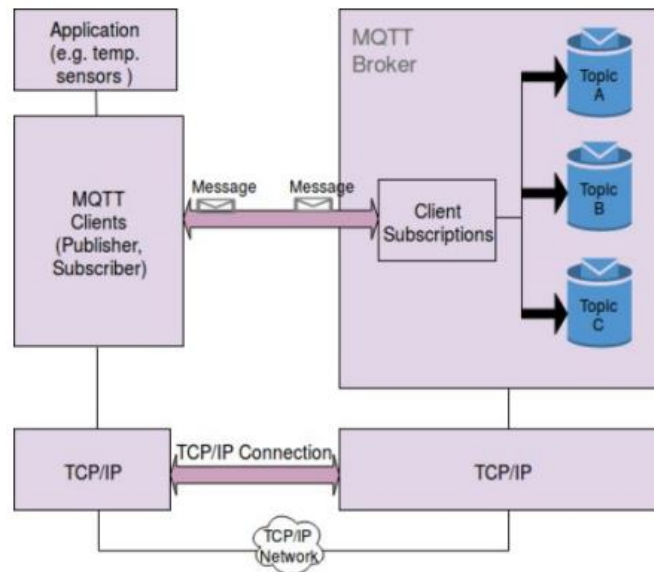
O MQTT é um protocolo de mensagens leve, desenvolvido para redes com limitações de largura de banda e dispositivos com recursos restritos. Sua arquitetura se baseia no modelo de publicação/assinatura (publish/subscribe), em que os dispositivos podem publicar mensagens em tópicos específicos e assinar tópicos de interesse para receber as mensagens correspondentes.

Este protocolo de comunicação opera por meio de três componentes principais: o publicador (publisher), o assinante (subscriber) e o broker. O publicador é responsável por enviar mensagens para um tópico específico, enquanto o assinante se registra para receber mensagens de tópicos de interesse. O broker atua como intermediário, recebendo as mensagens dos publicadores e encaminhando-as aos assinantes pertinentes.

Os publicadores enviam mensagens e os usuários se inscrevem em tópicos relacionados, o que permite uma eficiente troca de informações (Soni; Makwana, 2017). Os tópicos são considerados como assuntos das mensagens, nos quais os assinantes se inscrevem para receber mensagens específicas. É possível utilizar níveis de qualidade de serviço (Quality of Service - QoS) para garantir a entrega confiável das mensagens, com opções de QoS0 (envio no máximo uma vez), QoS1 (envio pelo menos uma vez) e QoS2 (envio exatamente uma vez). O MQTT também possibilita a retenção de mensagens pelo broker, as quais são enviadas aos novos clientes quando estes se conectam (Soni; Makwana, 2017).

A arquitetura de rede do protocolo MQTT é ilustrada a seguir conforme apresentado por Soni e Makwana (2017).

Figura 26 – Arquitetura de rede do protocolo MQTT apresentado por Soni e Makwana (2017)



Fonte: Soni e Makwana (2017).

A comunicação na Internet das Coisas (IoT) é beneficiada pelas vantagens significativas oferecidas pelo protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). Sua natureza leve e eficiente em termos de largura de banda e recursos o torna adequado para dispositivos com capacidades limitadas (Lin *et al.*, 2017). A arquitetura de publicação/assinatura proporciona flexibilidade e escalabilidade, permitindo a comunicação assíncrona e distribuída entre dispositivos (Carissimi, 2016). Além disto, o MQTT suporta diferentes níveis de qualidade de serviço (QoS), garantindo a entrega confiável das mensagens em ambientes de rede variados (Soni; Makwana, 2017).

A introdução do MQTT na arquitetura da IoT representa um avanço significativo na comunicação entre dispositivos IoT. Através do MQTT é possível estabelecer uma troca eficiente e escalável de informações, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais inteligentes e conectadas. A combinação das camadas de comunicação, nuvem e aplicação cria um ecossistema completo que impulsiona a transformação digital em diversos setores, melhorando a qualidade de vida das pessoas (Carissimi, 2016; Lin *et al.*, 2017).

A IoT emerge como uma tendência tecnológica que transforma a interação entre dispositivos e objetos, possibilitando sua conexão e troca de informações. Neste contexto, o protocolo MQTT desempenha um papel fundamental, proporcionando uma solução eficiente e escalável para a comunicação na IoT (Lin *et al.*, 2017). Com base nas características e benefícios do MQTT, verifica-se que este protocolo é adequado para o sistema proposto no presente trabalho. Sua utilização permitiu estabelecer uma comunicação eficiente entre o dispositivo e o servidor teste, viabilizando a coleta e o armazenamento dos dados (Carissimi,

2016). Portanto, com base nas evidências apresentadas, o uso do protocolo MQTT demonstra-se vantajoso para a implementação de sistemas IoT, proporcionando uma infraestrutura de comunicação eficiente e confiável, essencial para a interconexão e troca de informações entre dispositivos na Internet das Coisas (Soni; Makwana, 2017).

3 DESENVOLVIMENTO DOS DISPOSITIVOS DO SISTEMA

O desenvolvimento dos dispositivos para o "Sistema Remoto de Aquisição de Dados Universal com Teste de Equalização de Piezômetros Usando IoT" foi realizado em três fases macro. A primeira fase consistiu na definição dos requisitos gerais do sistema e suas métricas. Na segunda fase foram realizadas as atividades relacionadas à implementação do hardware e firmware do dispositivo. Na terceira e última fase foram conduzidos os testes de conceito e funcionalidade das placas de circuito impresso desenvolvidas, da interface de armazenamento de dados e do módulo de teste semiautomatizado de equalização em piezômetros tipo *standpipe*.

3.1 DESENVOLVIMENTO DA PLACA UNIVERSAL

3.1.1 Considerações iniciais

Com base na revisão bibliográfica do estado da arte de dispositivos IoT, circuitos de condicionamento de sinais e automatização de instrumentação de monitoramento de barragens foram estabelecidas as métricas iniciais para o desenvolvimento da "Placa Universal", que terá interação com o sistema como um todo. As etapas de desenvolvimento, incluindo a metodologia adotada, as simulações realizadas e as métricas utilizadas para a seleção dos componentes, entre outras informações relevantes, serão detalhadas nos próximos itens.

3.1.2 Metodologia para o desenvolvimento

Como mencionado anteriormente, no desenvolvimento da "Placa Universal" foram estabelecidas premissas e métricas que orientaram todo o processo. Estas premissas e métricas estão detalhadas a seguir:

1. Modularidade: a "Placa Universal" foi projetada com a abordagem modular, permitindo a incorporação de diferentes módulos para leitura de sensores analógicos, digitais e módulos de leitura. Esta característica torna a "Placa Universal" altamente versátil e capaz de atender a diversos requisitos de leitura de sensores e dispositivos. Um exemplo é o módulo de leitura de sensores de corda vibrante, chamado de "Placa de Condicionamento de Sinais", que será abordado em detalhes no item 3.2;

2. Baixo Consumo de Energia: uma premissa fundamental no desenvolvimento da "Placa Universal" é o baixo consumo de energia, uma vez que é essencial para dispositivos IoT operarem por longos períodos sem a necessidade de substituição ou recarga de bateria. Durante o desenvolvimento foram priorizados componentes de baixo consumo de energia e adotadas técnicas de gerenciamento energético visando melhorar a eficiência energética do dispositivo;
3. Conectividade: a conectividade é uma métrica chave para dispositivos IoT, que inclui velocidade de comunicação, implementação de ferramentas de segurança de rede, compatibilidade com protocolos de comunicação e facilidade de configuração e gerenciamento da rede. Estas características são essenciais para permitir a transmissão dos dados de monitoramento para os servidores responsáveis pelo armazenamento. A escalabilidade também é considerada, levando em conta o número máximo de conexões suportadas, capacidade de processamento e armazenamento de dados, além da facilidade de implantação e gerenciamento em redes de grande escala;
4. Custo: a métrica de custo também foi considerada, uma vez que o objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema capaz de realizar a leitura e transmissão automática dos principais tipos de sensores utilizados no monitoramento de barragens, especialmente sensores de corda vibrante. Portanto, a busca por soluções de baixo custo foi levada em consideração.

Em resumo, as métricas estabelecidas no desenvolvimento da "Placa Universal" são de extrema importância para garantir o seu desempenho e funcionalidade eficientes no contexto da IoT e do monitoramento de barragens. A modularidade permite a adaptação a diferentes requisitos de leitura de sensores, enquanto o baixo consumo de energia assegura a operação contínua do dispositivo. A conectividade e a escalabilidade garantem uma comunicação adequada e o suporte a redes em expansão, enquanto o custo busca uma solução acessível para a implementação do sistema.

No próximo item será abordada a escolha do embarcado, que se caracteriza como o componente central da "Placa Universal". Serão apresentados os critérios considerados para esta escolha, levando em conta as especificidades do projeto e os requisitos técnicos necessários.

3.1.2.1 Escolha do microcontrolador (embarcado) a ser utilizado na “Placa Universal”

No desenvolvimento da “Placa Universal”, as métricas estabelecidas desempenham um papel fundamental na seleção dos componentes e dispositivos utilizados. Estas métricas foram definidas com base na necessidade de garantir um sistema de baixo custo, eficiente em termos de consumo de energia e capaz de ler diferentes tipos de instrumentos de monitoramento de barragens.

No contexto da escolha do microcontrolador, especificamente, foram consideradas métricas relacionadas à capacidade de leitura dos sensores utilizados no monitoramento de barragens. Um dos aspectos relevantes foi a presença de um conversor analógico-digital com resolução mínima de 12 bits e uma taxa de amostragem de pelo menos 10 ksps. Esta taxa de amostragem atende aos requisitos do Teorema de Nyquist, garantindo a fidelidade na conversão do sinal analógico em digital.

O Teorema de Nyquist estabelece que a taxa de amostragem deve ser pelo menos o dobro da frequência do sinal de interesse para obter uma representação digital precisa. Levando em consideração a faixa de frequência dos sensores de corda vibrante utilizados, que varia de 350 Hz a 3600 Hz, a métrica de 10 ksps foi estabelecida para garantir a captura adequada destes sinais.

A Tabela 5 apresenta de forma detalhada todas as métricas consideradas para a escolha do microcontrolador, levando em conta as especificidades do projeto e os requisitos técnicos necessários.

Tabela 5 – Métricas para escolha do Microcontrolador

Métricas
Consumo
Tensão de Operação
Memória RAM
Memória ROM
Memória flash
Clock
Entradas e saídas (GPIOs)
Periféricos
Conectividade
Protocolos de comunicação
Interface com LoRa
Preço médio
Dimensões

Métricas
Interfaces de Comunicação
Suporte da Comunidade
Recursos Adicionais
Plataforma de Desenvolvimento

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A seleção do dispositivo embarcado adequado para um projeto é uma etapa essencial que envolve a consideração de diversas variáveis, além das métricas estabelecidas. Além disto, é necessário levar em conta fatores como capacidade de processamento, memória, interfaces de comunicação, disponibilidade de bibliotecas e facilidade de uso. No caso específico do desenvolvimento de um dispositivo para leitura de instrumentos de corda vibrante, que apresentam variações de frequência entre 350 Hz e 3600 Hz, é crucial optar por um dispositivo embarcado com um conversor analógico-digital (ADC) de alta resolução e capacidade de processamento para lidar com os dados obtidos.

Dentre os dispositivos embarcados amplamente utilizados no mercado, destacam-se o Arduino Uno, Arduino Mega, ESP8266, STM32 e ESP32. Todos estes dispositivos possuem ADCs integrados, sendo que alguns também possuem interfaces de comunicação, como Wi-Fi e Bluetooth, que podem ser relevantes para o projeto em questão. Contudo, a seleção final deve ser baseada nas características específicas de cada dispositivo embarcado, bem como em suas capacidades em relação aos requisitos do projeto.

A seguir são apresentados resumidamente os dispositivos embarcados mencionados anteriormente. Eles foram selecionados por atenderem às métricas estabelecidas, com destaque para o baixo custo e a facilidade de aquisição no Brasil.

Arduino Uno

O Arduino Uno é um microcontrolador de 8 bits baseado no chip Atmega328P, fabricado pela Atmel. O Arduino Uno (Figura 27) possui um canal ADC de 10 bits integrado, capaz de converter sinais analógicos em valores digitais com uma resolução de até 1024 valores distintos. Embora seja um dispositivo embarcado popular e de fácil utilização, sua resolução ADC é limitada em relação às exigências do projeto, que requer uma maior precisão na leitura dos sinais provenientes dos instrumentos de corda vibrante.

Figura 27 – Arduino UNO



Fonte: Arduino store - <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>

Arduino Mega

O Arduino Mega é outro dispositivo embarcado que se destaca pela sua capacidade de leitura analógica. Diferente do Arduino Uno, o Arduino Mega (Figura 28) possui um total de 16 canais ADC de 10 bits embutidos, o que representa um aumento significativo na capacidade de conversão analógico-digital em comparação ao Uno. No entanto, apesar desta melhoria, a resolução de 10 bits do ADC ainda pode não atender às demandas de precisão requeridas pelo projeto em questão, especialmente na leitura dos sinais provenientes dos instrumentos de corda vibrante.

Figura 28 – Arduino Mega



Fonte: Arduino store - <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>

ESP8266

O ESP8266 é um microcontrolador de 32 bits fabricado pela Espressif Systems, amplamente utilizado em projetos de IoT. O dispositivo possui uma única entrada ADC de 10 bits, que é responsável pela conversão dos sinais analógicos em valores digitais. Embora o ESP8266 (Figura 29) ofereça alta capacidade de processamento e seja conhecido por sua capacidade de comunicação Wi-Fi, a limitação da resolução do ADC em 10 bits pode restringir sua precisão na leitura dos sinais provenientes dos instrumentos de corda vibrante.

Figura 29 – ESP8266



Fonte: Eletrogate - <https://www.eletrogate.com/modulo-wifi-esp8266-nodemcu-v3-lolin>

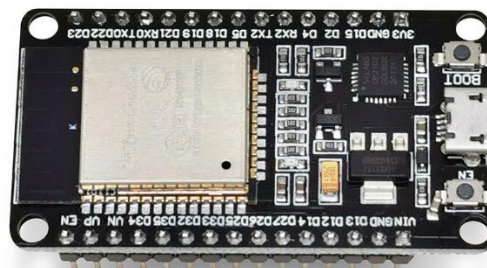
ESP32

O ESP32, um microcontrolador de 32 bits fabricado pela Espressif Systems, destaca-se entre os dispositivos embarcados mencionados anteriormente devido aos seus 2 canais ADC de 12 bits disponibilizados em 18 GPIOs. Esta capacidade de leitura analógica superior permite uma maior precisão na leitura dos sinais provenientes dos instrumentos de corda vibrante. Ademais, o ESP32 oferece uma ampla gama de interfaces de comunicação, como Wi-Fi, Bluetooth, Ethernet e CAN, que podem ser exploradas na implementação do projeto.

Com sua resolução de 12 bits, o ESP32 (Figura 30) é capaz de fornecer até 4096 valores diferentes na leitura dos sinais, o que atende plenamente às necessidades do projeto em questão. Esta capacidade de leitura analógica aprimorada contribui para uma maior precisão na obtenção dos dados dos sensores de corda vibrante.

Outro aspecto vantajoso do ESP32 é sua eficiência energética. O dispositivo é projetado para operar em baixo consumo de energia, o que é especialmente relevante para aplicações que dependem de alimentação por bateria. A capacidade de operar com consumo reduzido de energia torna o ESP32 uma escolha viável para projetos que necessitam de autonomia prolongada.

Figura 30 – ESP32



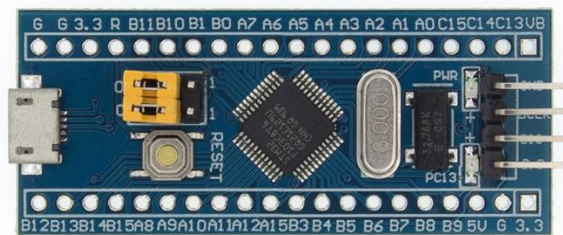
Fonte: Eletrogate - <https://www.eletrogate.com/modulo-wifi-esp32-bluetooth-30-pinos>

STM32F103C8T6:

O STM32F103C8T6 é um microcontrolador de 32 bits fabricado pela STMicroelectronics, que possui características adequadas para diversos projetos. Equipado com um processador ARM Cortex-M3 de núcleo único, ele oferece capacidade de processamento satisfatória. O dispositivo possui uma memória flash de 64KB, memória RAM de 20KB e uma ampla variedade de interfaces de comunicação, como I2C, SPI e UART. Também possui um conversor analógico para digital (ADC) de 12 bits, o que possibilita a leitura precisa de sinais analógicos.

O STM32F103C8T6 (Figura 31) destaca-se pela sua versatilidade e recursos avançados, atendendo às demandas de projetos que requerem capacidade de processamento, comunicação e aquisição de dados analógicos. Sua combinação de desempenho e suporte da comunidade o torna uma escolha confiável para aplicações diversas.

Figura 31– STM32F103C8T6



Fonte: Eletrogate - <https://www.eletrogate.com/placa-de-desenvolvimento-stm32f030c8t6-arm-stm32>

A seguir nas Tabela 6 e Tabela 7 são apresentadas as características técnicas dos embarcados e respectivos microcontroladores e conversores analógicos/digitais, subsidiando assim a escolha do embarcado a ser utilizado no projeto.

Tabela 6 – Lista de características dos embarcados com base nas métricas estipuladas

Modelo	Arduino UNO	Arduino Mega	ESP8266	ESP32	STM32-F103C8T6
Fabricante	Arduino	Arduino	Espressif Systems	Espressif Systems	STMicroelectronics
Tipo de CPU	8 Bits	8 Bits	32 Bits	32 Bits	32 Bits
Processador	ATmega328	ATmega2560	Xtensa Single-core L106	Xtensa Dual-core LX6, 600 DMIPS	ARM Cortex-M3
Programável	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Consumo	20mA por pino	20mA por pino	Aprox. 200mA (Wi-Fi ativo)	Aprox. 200mA (Wi-Fi ativo)	Varia dependendo do uso

Modelo	Arduino UNO	Arduino Mega	ESP8266	ESP32	STM32-F103C8T6
Tensão de Operação	5V	5V	3,3V	3,3V	3,3V ou 5V
Memória RAM	2KBytes	2KBytes	128KBytes	520KBytes	20KB
Memória ROM	EPROM 2KBytes	EPROM 4KBytes	64KBytes	448KBytes	64KB
Memória flash	32KB	256KB	16MBytes	16MBytes	64KB
Clock	16MHz	16MHz	80MHz	160MHz	72MHz
Entradas e saídas (GPIOs)	14	56	17	36	37
Periféricos	Conversor ADC/DA embutido	Conversor ADC/DA embutido	Conversor ADC/DA embutido	Conversor ADC/DA embutido	Conversor ADC/DA embutido
Conectividade	Módulo externo disponível	Módulo externo disponível	Bluetooth e Wi-Fi disponíveis	Bluetooth e Wi-Fi disponíveis	Módulo externo disponível
Protocolos de comunicação	I ² C, SPI, UART	I ² C, SPI, UART	I ² C, SPI, UART	I ² C, SPI, UART	I ² C, SPI, UART
Interface com Lora	Módulo externo disponível	Módulo externo disponível	Módulo externo disponível	Modelo com Lora embarcado	Módulo externo disponível
Preço médio	R\$ 90,00	R\$ 200,00	R\$ 65,00	R\$ 80,00	R\$ 60,00
Dimensões	68.6mm x 53.4mm	101.5mm x 53.3mm	25mm x 32mm	54mm x 26mm	50mm x 20mm
Interfaces de Comunicação	USB, UART	USB, UART	Wi-Fi, Bluetooth, USB, UART, I ² C, SPI	Wi-Fi, Bluetooth, USB, UART, I ² C, SPI	USB, UART, I ² C, SPI
Suporte da Comunidade	Ampla	Ampla	Ampla	Ampla	Ampla
Recursos Adicionais	-	-	WiFi integrado, menor consumo de energia	WiFi e Bluetooth integrados, maior capacidade de processamento	-
Plataforma de Desenvolvimento	Arduino IDE	Arduino IDE	Arduino IDE, MicroPython	Arduino IDE, MicroPython, ESP-IDF	Arduino IDE, STM32CubeIDE

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 7 – Comparação entre os conversores analógicos digitais dos embarcados

Embarcado	Número de canais ADC	Resolução ADC	Taxa máxima de amostragem
Arduino UNO	1	10 bits	10 kSps

Embarcado	Número de canais ADC	Resolução ADC	Taxa máxima de amostragem
Arduino Mega	16	10 bits	15 kSps (por canal)
ESP8266	1	10 bits	10 kSps
ESP32	2 – 18 portas	12 bits	2.4 MSps (com resolução de 8 bits)
STM32F103C8T6	10	12 bits	1 MSps

Fonte: Elaborado pelo Autor

Ao comparar os parâmetros das Tabela 6 e Tabela 7, é evidente que o ESP32 se destaca como a escolha preferida para o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados para monitoramento de barragens, com ênfase na leitura de sensores de corda vibrante. Comparado ao Arduino UNO, Arduino Mega, ESP8266 e STM32-F103C8T6, o ESP32 oferece várias vantagens significativas.

Em termos de processamento, o ESP32 possui um processador de 32 bits, superando o Arduino UNO, Arduino Mega. Sua maior capacidade de processamento permite tarefas mais complexas e o desenvolvimento de projetos avançados. O ESP32 também se destaca em conectividade, com Wi-Fi e Bluetooth integrados, algo que o Arduino UNO, Arduino Mega e o STM32-F103C8T6 não possuem. Esta conectividade sem fio é essencial para projetos de IoT.

Em relação à memória, o ESP32 oferece capacidade superior ao Arduino UNO, Arduino Mega, ESP8266 e STM32-F103C8T6, com 520KB de memória RAM e 448KB de memória ROM. Isto permite o armazenamento e processamento de quantidade maior de dados. Quanto ao número de GPIOs, o ESP32 possui 36, mais do que o Arduino UNO, ESP8266 e STM32, possibilitando a conexão de vários dispositivos externos. Em termos de preço médio, o ESP32 oferece uma excelente relação custo-benefício, com um valor médio de aproximadamente R\$ 80,00.

E o ESP32 se destaca pela sua capacidade de conversão analógico-digital (ADC) superior em comparação aos demais embarcados. Com seus 2 canais ADC disponíveis em 18 portas e uma resolução de 12 bits, o ESP32 oferece uma taxa máxima de amostragem de 2.4 MSps (com resolução de 8 bits). Esta capacidade de conversão de alta qualidade e velocidade permite uma leitura precisa e eficiente dos sinais dos sensores de corda vibrante, garantindo a precisão e confiabilidade do sistema de monitoramento de barragens.

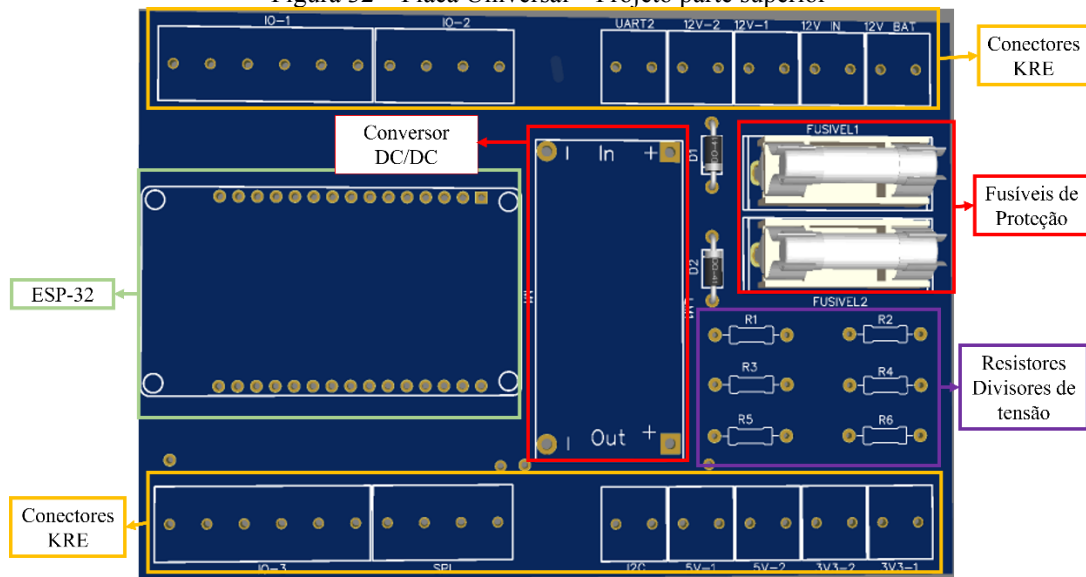
3.1.2.2 Projeto e elaboração da Placa Universal

Após a seleção do microcontrolador embarcado, as demais métricas foram definidas para o projeto da "Placa Universal", incluindo os níveis de tensão necessários, as portas disponibilizadas na placa e as proteções dos circuitos. A escolha destas métricas teve como objetivo garantir a máxima flexibilidade e adaptabilidade da placa para diversas aplicações, incluindo a leitura de instrumentos elétricos do tipo de corda vibrante, instrumentos que variam corrente e tensão, módulos sensores disponíveis, entre outros.

A Figura 32 apresenta a vista superior e Figura 33 a vista inferior do projeto modelo 3D da "Placa Universal". Já a Figura 34 mostra a vista superior do modelo 2D, destacando os componentes. O projeto da "Placa Universal" foi elaborado utilizando o software on-line e gratuito EasyEDA.

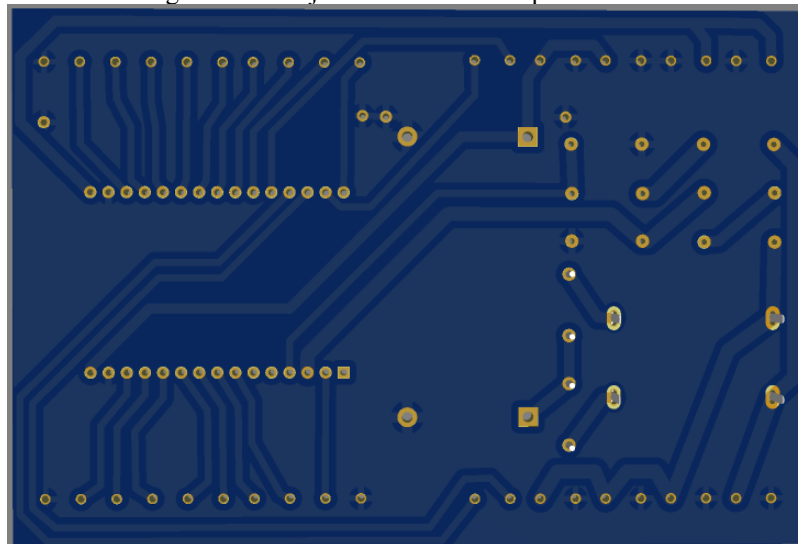
O EasyEDA é uma plataforma on-line de design e simulação de circuitos eletrônicos. É amplamente utilizado por engenheiros e entusiastas para criar esquemas de circuitos, projetar placas de circuito impresso (PCBs) e simular o funcionamento destes circuitos. Com uma interface intuitiva e recursos de arrastar e soltar, o EasyEDA torna o processo de design de circuitos eletrônicos mais acessível e fácil de usar. Ele permite que os usuários criem e compartilhem seus projetos de forma conveniente. Ademais, o EasyEDA oferece recursos de colaboração, possibilitando que equipes de projetos trabalhem juntas compartilhando projetos, bibliotecas de dispositivos e outras informações e ferramentas.

Figura 32 – Placa Universal – Projeto parte superior



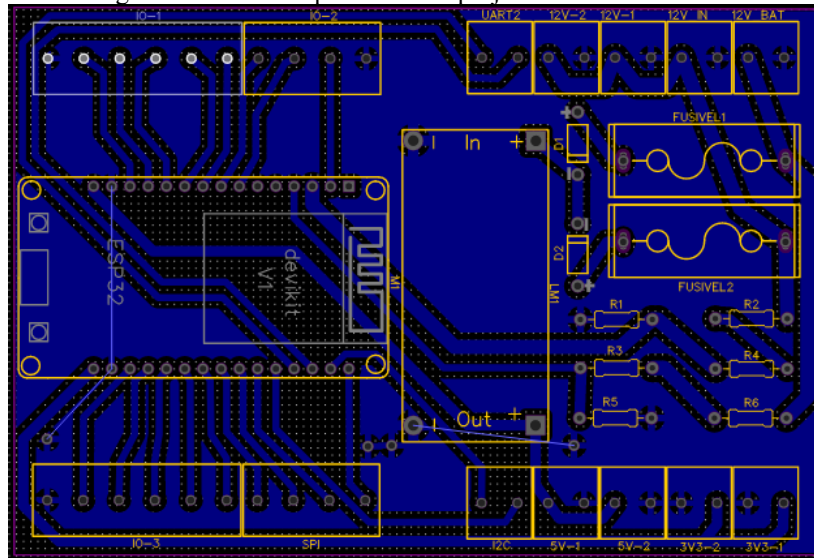
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 33 – Projeto Placa Universal parte inferior



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 34 – Vista Superior 2D do projeto da Placa Universal



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A elaboração do projeto da "Placa Universal" foi conduzida seguindo as melhores práticas de engenharia, com o propósito de assegurar um design que proporcione um bom funcionamento do protótipo. Foram adotadas medidas como evitar trilhas com curvas em 90 graus e incluir um plano terra para mitigar ruídos indesejados, entre outras considerações relevantes. A seguir serão abordados os principais componentes da "Placa Universal", detalhando suas funções.

O uso do módulo conversor DC/DC na placa possibilita que esta seja alimentada por uma ampla faixa de tensões, de 5 a 36 volts, provenientes de fontes externas como baterias, painéis solares ou fontes de alimentação. O conversor DC/DC foi configurado para fornecer uma tensão de 5V, utilizando os 12 volts provenientes da fonte de alimentação externa. Adicionalmente, o regulador de tensão integrado ao ESP32 é capaz de gerar uma tensão de 3,3V. Com isto, a placa oferece três níveis de tensão distintos (12V, 5V e 3,3V). Esta flexibilidade de tensão é fundamental para garantir a compatibilidade com diferentes tipos de dispositivos, bem como proporcionar estabilidade e eficiência energética da placa em diversos cenários de aplicação.

As portas digitais, analógicas, I2C, UART e SPI foram selecionadas visando garantir a máxima compatibilidade com uma variedade de dispositivos, permitindo que a placa seja facilmente integrada em projetos que requerem diferentes tipos de comunicação. As portas analógicas desempenham um papel importante na leitura dos instrumentos de corda vibrante, porque possibilitam a aquisição dos sinais analógicos gerados por esses instrumentos.

A escolha dos conectores KRE na solução justifica-se pela facilidade e praticidade de conexão que estes conectores proporcionam. Com terminais de encaixe rápido, os conectores

KRE permitem uma conexão segura e confiável entre os componentes do sistema. Isto facilita a montagem e desmontagem dos módulos, tornando o processo de expansão e reconfiguração do sistema mais ágil e eficiente.

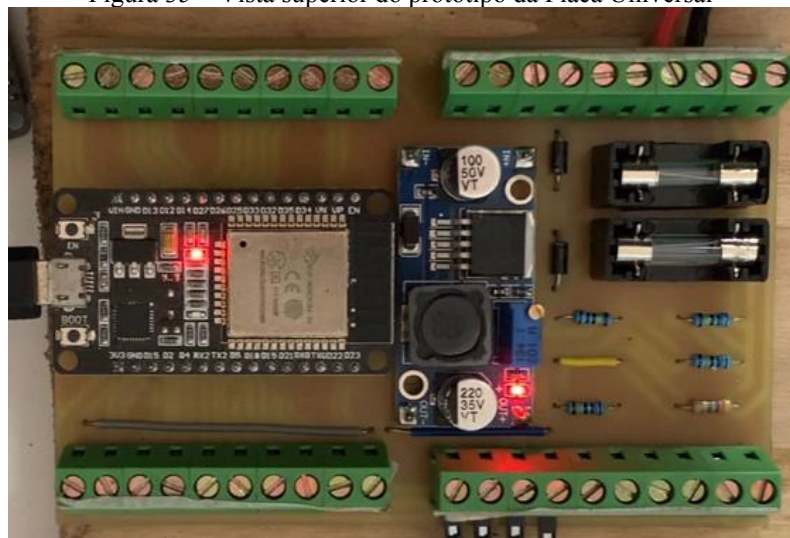
Foram adicionados divisores de tensão resistivos para possibilitar a medição da tensão da bateria e da fonte de alimentação, permitindo que o usuário monitore a energia disponível na placa e evite interrupções indesejadas no funcionamento do sistema.

Os diodos D1 e D2 incluídos na "Placa Universal" têm a função de selecionar a tensão que será disponibilizada para os demais componentes quando duas fontes de tensão, como bateria e fonte de alimentação, forem conectadas à placa. Com a utilização destes componentes, a "Placa Universal" utilizará a fonte de energia que apresentar a maior tensão disponível.

Por fim, os fusíveis de proteção foram incorporados para garantir a segurança e proteção dos componentes eletrônicos em situações de picos de tensão ou curtos-circuitos.

Em resumo, a "Placa Universal", ilustrada na Figura 35, representa uma solução versátil e eficiente para projetos de IoT. Com diversos níveis de tensão disponíveis e conectores KRE de fácil conexão, ela oferece compatibilidade com uma variedade de dispositivos. Recursos adicionais, como divisores de tensão, diodos de chaveamento e fusíveis de proteção, asseguram a estabilidade e segurança dos componentes eletrônicos. Os testes de funcionamento e validação da "Placa Universal" são detalhados no Capítulo 5 desta dissertação.

Figura 35 – Vista superior do protótipo da Placa Universal



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2 DESENVOLVIMENTO DA PLACA DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS PARA SENSORES DE CORDA VIBRANTE

3.2.1 Considerações iniciais

No processo de desenvolvimento da placa de condicionamento de sinais para leitura de sensores de corda vibrante foram levadas em consideração as informações obtidas por meio de pesquisa bibliográfica, com o objetivo de compreender o estado da arte em termos de circuitos de condicionamento de sinais e dispositivos projetados para esta finalidade específica.

A Placa de condicionamento de sinais para leitura de sensores de corda vibrante seguiu as métricas gerais estabelecidas para a "Placa Universal", as quais incluem modularidade, baixo custo, baixo consumo de energia e escalabilidade. A modularidade refere-se ao desenvolvimento da placa como um módulo adicional para "Placa Universal", enquanto o baixo custo, baixo consumo de energia e escalabilidade são requisitos importantes para garantir a viabilidade e a flexibilidade do dispositivo.

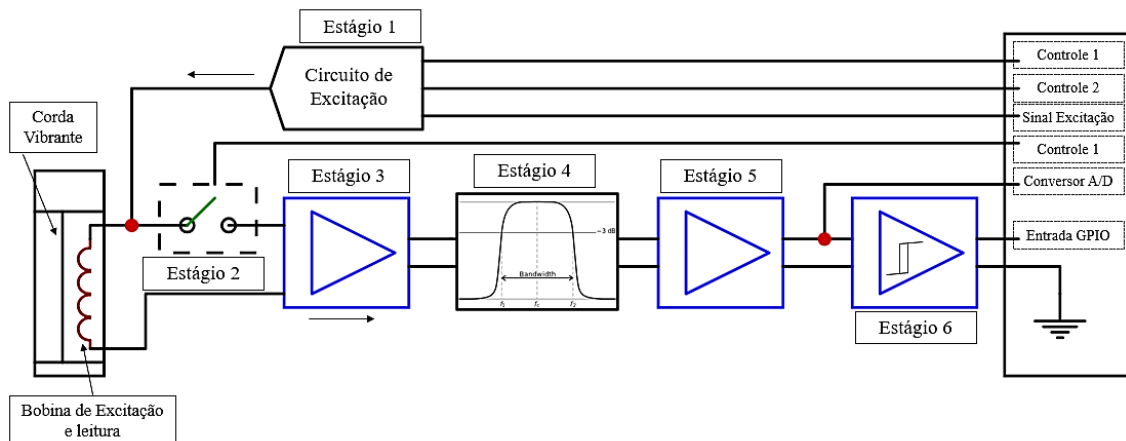
3.2.2 Metodologia do desenvolvimento

Com base nos critérios mencionados, estabeleceu-se uma premissa para o desenvolvimento da placa de condicionamento de sinais, a qual consiste em incorporar o arranjo básico de circuitos direcionados à leitura de sensores de corda vibrante, conforme descrito no Capítulo 2, Seção 2.4 deste trabalho. Portanto, o dispositivo desenvolvido deve incluir, no mínimo, os seguintes estágios de circuito:

1. Circuito de excitação;
2. Chaveamento do sinal;
3. Amplificação primária;
4. Filtro passa-faixa;
5. Amplificação Final e Condicionamento;
6. Estágio de retificação (opcional).

A Figura 36 apresenta o diagrama em blocos da placa de condicionamento de sinais desenvolvida para a leitura de sensores de corda vibrante. O diagrama inclui todos os estágios previamente listados, conforme descrito anteriormente.

Figura 36 – Diagrama em Blocos da Placa de condicionamento de Sinais



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O Primeiro estágio se trata do circuito de excitação que tem a função de condicionar o sinal gerado pelo microcontrolador antes de ser injetado no sensor de corda vibrante. Ele proporciona um ganho de corrente ao sinal injetado e serve como proteção adicional para a GPIO do microcontrolador, que gera o sinal aplicado ao sensor.

O segundo estágio se trata do chaveamento do sinal que desempenha um papel crucial no circuito de condicionamento de sinal. Ele direciona tanto o sinal de excitação quanto o sinal devolvido pelo sensor, considerando que o sinal de excitação e o sinal de retorno são transmitidos pelo mesmo condutor. Este estágio isola o circuito de condicionamento quando o sensor é excitado e isola o microcontrolador, direcionando o sinal para o primeiro estágio de condicionamento quando o sensor retorna o sinal.

O terceiro estágio refere-se à amplificação primária do sinal devolvido pelo sensor. O sinal devolvido pelo sensor é caracterizado por sua baixa amplitude, aproximadamente 2 mV, com decaimento exponencial ao longo do tempo e contendo a frequência de vibração da corda do sensor, conforme abordado no item 2.4. Portanto, o objetivo deste estágio inicial de amplificação é amplificar o sinal de entrada, proporcionando as condições necessárias para o próximo estágio processar o sinal adequadamente.

O quarto estágio consiste em um filtro passa-faixa, cuja função é filtrar os sinais que estejam fora da faixa de frequência de trabalho dos sensores de corda vibrante. Isto é essencial para evitar erros de leitura causados por ruídos ambientais, rede elétrica, sinais de RF, entre outros. Para determinar os limites de frequência a serem utilizados no projeto do filtro passa-faixa foi realizada uma extensa pesquisa nos manuais dos principais fabricantes de sensores de corda vibrante, como DGSI, Geokon, RST, Encardio Rite, Geosense, Sisgeo e Slope Indicator. Estes fabricantes foram selecionados devido à sua relevância comercial e à ampla aplicabilidade

de seus sensores no Brasil. Várias barragens que tiveram sua instrumentação automatizada, conforme mencionado no item 2.2 do Capítulo 2, utilizaram sensores dessas marcas.

Com base na pesquisa sobre a faixa de operação dos sensores mencionada anteriormente, foi elaborada a Tabela 8 (a seguir) que contém informações sobre as marcas, modelos e os valores mínimo e máximo de frequência de trabalho de cada sensor elétrico de corda vibrante. Pode-se identificar que o filtro passa-faixa deverá ser projetado com uma faixa mínima entre 350 Hz e 3600 Hz. Esta faixa de frequência é importante para buscar a eficiência do filtro ao eliminar sinais indesejados e ruídos externos, evitando assim possíveis erros de leitura.

Tabela 8 – Faixa de frequência de trabalho dos sensores elétricos de corda vibrante de diversas marcas

Tabela de valores de faixa de frequência de trabalho de sensores de Corda Vibrante			
Marca	Modelo	Frequência mínima (Hz)	Frequência máxima (Hz)
DGSI	DGSI Piezometer	1400	3500
DGSI	DGSI Total Pressure Cell	1400	3500
DGSI	DGSI Spot Weld SG R	800	3500
DGSI	DGSI Spot Weld SG T	800	3500
DGSI	DGSI Arc Weld SG	450	1200
DGSI	DGSI Emb SG	450	1200
DGSI	DGSI Crackmeter	1400	3500
DGSI	DGSI Temp.	1200	1700
Geokon	GK 4000/4050 SG	450	1200
Geokon	GK 4100 Series	1400	3500
Geokon	GK 4200/4202/4210 S	450	3500
Geokon	GK 4911/4911A Rebar	1200	2800
Geokon	GK 4400 Series	1200	2800
Geokon	GK 4500 Piezometer	1400	3500
Geokon	GK 4600/4650 Settle	1400	3500
Geokon	GK 4675LV Weir	1400	3500
Geokon	GK 4800 Series	1400	3500
Geokon	GK 4900 Series(lbs)	1400	3500
Geokon	GK 4900 Series(kgs)	1400	3500
Geokon	GK 6300 Series	1400	3500
Geokon	GK 4700 Temp	1400	3500
Geokon	GK 4151 Miniatura SG	1400	3500
RST	RST VW2100 Piezometer	1400	3500
RST	RST VW105 Liquid Se	1400	3500
RST	RST VW Earth Pressure	1400	3500
RST	RST VW5000/5003 Str	1400	3500
RST	RST VWSG-S Spot Wel	1400	3600

Tabela de valores de faixa de frequência de trabalho de sensores de Corda Vibrante

Marca	Modelo	Frequência mínima (Hz)	Frequência máxima (Hz)
RST	RST VWSG-A Arc Weld	450	1500
RST	RST VWSG-E Embedmen	450	1500
RST	RST VWCM Crackmeter	1400	3500
Encardio Rite	EPU-20V Uplift Pressure Measuring System	2250	2650
Encardio Rite	EDS-20V-SW Strain Gage	2500	3300
Geosense	VWP-3000 Series VW Piezometers	1850	3500
Geosense	VWT-9000 Series Pressure Transducer	1850	3500
Geosense	VWLC5050 Series Solid Load Cells	1200	2800
Geosense	VWLC 5000 Series Anchor Load Cells	1200	2800
Geosense	VWDT-5000 Serie Displacement Gauge	1650	2700
Geosense	VWDT-6000 Serie Displacement Gauge	1650	2700
Geosense	VWTCM-4600 Crack Meter	1650	2700
Geosense	VWCM-4000 Series Crack Meter	1650	2700
Geosense	VWS-2100 Strain Gauge Embedment	850	1550
Geosense	VWS-2120 Strain Gauge Embedment	1350	3150
Geosense	VWS-2125 Strain Gauge Embedment	850	1550
Geosense	VWS-2000 Series Strain Gauge Surface Mount	900	2000
Geosense	VWS-2010 Series Strain Gauge Surface Mount	900	2000
Geosense	VWS-2020 Series Strain Gauge Spot Weld	1500	3500
Geosense	VWS-2800 Strain Gauge	850	1550
Geosense	GEO-XS VW Soil Extensometer	1650	2700
Geosense	VWTS-6000 Temperatura Sensor	2000	3500
Sisgeo	PK45M Multipoint Piezometer	2250	3000
Sisgeo	PK20S Piezometer	2250	3000
Sisgeo	PK20A Piezometer	2250	3000
Sisgeo	PK45S Piezometer	2250	3000
Sisgeo	PK45A Piezometer	2250	3000
Sisgeo	PK45H Piezometer	2250	3000
Sisgeo	0VK4000VS00 Strain Gauges	500	1000
Sisgeo	0VK4000VSC0 Strain Gauges	500	1000
Sisgeo	0VK4200VSC0 Strain Gauges	500	1015
Sisgeo	0VK4200VCHP Strain Gauges	520	1025
Sisgeo	0VK4000SM00 Strain Gauges	1800	2460
Sisgeo	0VK4100VS00 VW Spot Weldable Straing Gauges	1130	3000
Sisgeo	0D233025L10 VW Deformation Meters	2250	3000
Sisgeo	0D233050L10 VW Deformation Meters	2250	3000
Sisgeo	0D2330100L10 VW Deformation Meters	2250	3000
Sisgeo	0D2330150L10 VW Deformation Meters	2250	3000
Sisgeo	0D313S010VW Crackmeters Series	1500	2800

Tabela de valores de faixa de frequência de trabalho de sensores de Corda Vibrante

Marca	Modelo	Frequência mínima (Hz)	Frequência máxima (Hz)
Slope Indicator	VW Piezometer (Todos os modelos)	1400	3500
Slope Indicator	VW Total Pressure Cell	1400	3500
Slope Indicator	Non-Vented Settlement Cells VW	1400	3500

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O quinto estágio representa o estágio final do circuito, em que é aplicado o último amplificador operacional. Sua principal função é condicionar o sinal de saída dos estágios anteriores para os níveis de tensão adequados, de modo que possam ser corretamente lidos pelo microcontrolador presente na "Placa Universal".

É importante ressaltar que o microcontrolador utilizado na "Placa Universal" é o ESP32, o qual requer que o sinal de entrada do seu conversor analógico-digital esteja dentro da faixa de 0 a 3,3V. Portanto, o estágio de amplificação final é essencial para ajustar o sinal de saída e garantir que esteja dentro desses limites de tensão especificados. Desta forma, o sinal condicionado estará pronto para ser corretamente interpretado e processado pelo microcontrolador, para posterior utilização para calcular as medidas feitas pelos sensores elétricos de corda vibrante.

O sexto e último estágio consiste em um retificador do sinal fornecido pelo quinto estágio. Sua função é converter o sinal senoidal, com amplitude variando de 0 a 3,3V, em um sinal de onda quadrada, mantendo a frequência do sinal senoidal original. Diversas abordagens podem ser utilizadas para esta transformação e neste projeto será empregado um circuito Schmitt Trigger.

O circuito Schmitt Trigger, também conhecido como disparador de Schmitt, é um tipo de circuito eletrônico utilizado para converter um sinal de entrada analógico em um sinal digital de saída. Este circuito foi projetado para lidar com sinais de entrada que apresentam variações de amplitude ou ruídos, proporcionando uma resposta mais robusta e confiável.

O princípio de funcionamento do circuito Schmitt Trigger é baseado no ajuste da histerese. Ele possui dois níveis de tensão de referência, um para acionamento e outro para desativação, os quais determinam o comportamento do circuito. Quando o sinal de entrada ultrapassa o nível de acionamento, a saída muda para um estado lógico definido, geralmente alto. Quando o sinal de entrada cai abaixo do nível de desativação, a saída muda para outro estado lógico definido, geralmente baixo.

Um dos principais parâmetros a serem ajustados no circuito Schmitt Trigger é a histerese, que é a diferença de tensão entre os níveis de acionamento e desativação. Esta histerese evita flutuações indesejadas na saída quando o sinal de entrada está próximo dos níveis de referência. Esta propriedade é especialmente útil para evitar oscilações ou instabilidades em sinais que possam sofrer interferências ou variações rápidas.

O circuito Schmitt Trigger é amplamente utilizado em aplicações onde é necessário converter sinais analógicos em sinais digitais estáveis e livres de ruídos. Neste sentido, torna-se aplicável ao sexto estágio de condicionamento de sinal.

Vale ressaltar que o sexto estágio é considerado opcional, visto que o microcontrolador possui um conversor A/D embutido, o qual possibilita a leitura direta do sinal fornecido pelo quinto estágio de condicionamento. Com isto, busca-se preencher uma lacuna na bibliografia existente sobre os circuitos de condicionamento de sinais. A Placa de Condicionamento de Sinais foi projetada para ler os sinais tanto diretamente no quinto estágio, utilizando o conversor A/D do ESP, quanto os sinais digitais gerados pelo sexto estágio.

Esta abordagem foi escolhida com o objetivo de comparar o desempenho das duas formas de leitura, a fim de diagnosticar se existem diferenças entre elas, bem como identificar as vantagens e desvantagens de cada uma do ponto de vista operacional do dispositivo desenvolvido.

Após definir os estágios de condicionamento de sinais necessários para o desenvolvimento da Placa de Condicionamento de Sinais, foram realizadas as seguintes etapas de desenvolvimento:

- Concepção e simulações dos estágios de condicionamento de sinais de forma individual usando softwares de simulação com componentes ideais;
- Seleção dos componentes comerciais adequados para cada estágio da Placa de Condicionamento de Sinais;
- Simulação dos estágios de condicionamento em conjunto, utilizando os componentes comerciais selecionados;
- Teste e validação de cada estágio individualmente em uma bancada de testes, com base nos dados das simulações;
- Teste e validação dos estágios em conjunto em uma bancada de testes;
- Revisão dos projetos validados na bancada e elaboração do projeto final da Placa de Condicionamento de Sinais no EasyEDA;
- Fabricação da Placa de Condicionamento de Sinais, de acordo com o projeto finalizado no EasyEDA.

Deste modo, serão apresentadas nos subitens subsequentes as simulações realizadas, as definições dos componentes utilizados na placa, as simulações executadas com os componentes definidos e os testes realizados em bancada para cada estágio. Em seguida será abordada a elaboração do projeto da Placa de Condicionamento de Sinais e, por fim, será apresentada a placa pronta.

3.2.2.1 Concepção dos circuitos e simulações iniciais da placa de condicionamento de sinais

Uma vez definidos os estágios de condicionamento de sinais necessários para a leitura dos sensores de corda vibrante, com base nos circuitos apresentados no Capítulo 2, Seção 2.4, foram realizadas simulações dos estágios utilizando os softwares MultSim14 Nacional Instruments (2016) e Proteus 8 Labcenter Electronics (2017), inicialmente empregando componentes ideais.

Estas simulações permitiram verificar o funcionamento conceitual dos circuitos de condicionamento, bem como confirmar o correto funcionamento de alguns circuitos mencionados nos estudos revisados no Capítulo 2 item 2.4.

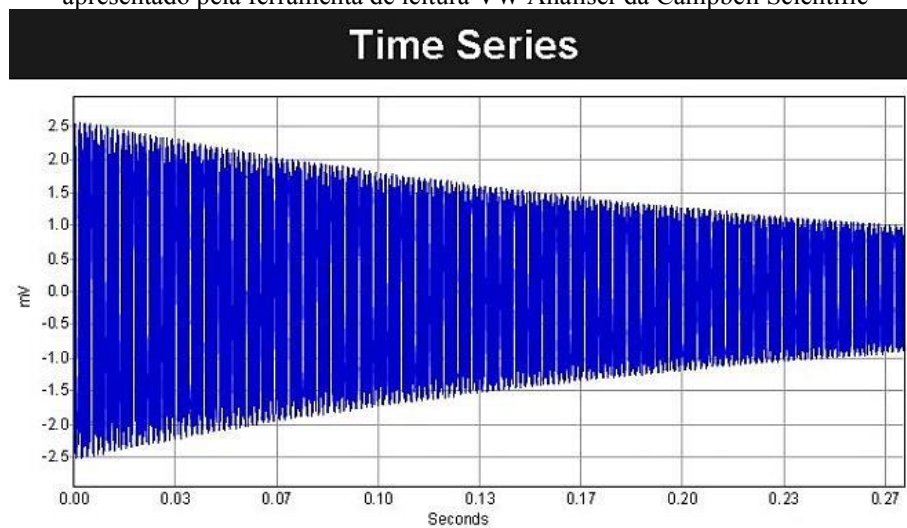
A primeira simulação teve como objetivo reproduzir, no software simulador, o sinal característico emitido pelo sensor de corda vibrante após ser excitado em sua frequência de vibração. Além da ampla gama de estudos relacionados à criação de dispositivos para leitura de sensores de corda vibrante, também foram encontradas pesquisas dedicadas exclusivamente ao estudo dos sinais elétricos característicos destes sensores (Soni; Makwana, 2017).

Estes estudos se concentraram tanto na análise do sinal de excitação a ser aplicado ao sensor de corda vibrante quanto no estudo aprofundado do sinal de resposta gerado pelo sensor após a excitação, correspondendo à leitura desse sensor, conforme abordado neste trabalho. Para subsidiar as características do sinal de resposta do sensor nas simulações, além das informações obtidas nos estudos revisados no Capítulo 2, Seção 2.4, foram consultados os trabalhos desenvolvidos por Viman e Lungu (2010) e por Pop, Pitica e Bande Pop (2010). Estes autores se dedicaram à caracterização dos sinais dos sensores de corda vibrante e criaram modelos elétricos para estes sensores.

Além das referências supracitadas, como objetos de análise foram utilizados dados de sensores reais. Estes dados foram adquiridos lendo sensores de corda vibrante com um dispositivo chamado “*VWAnalyzer*” da empresa Campbell Scientific (Campbell Scientific, s.d.). Este dispositivo não apenas permite a leitura dos sensores de corda vibrante, mas também disponibiliza graficamente os sinais obtidos. Na Figura 37 é apresentado um exemplo de um

gráfico do sinal lido de um piezômetro modelo 4500C da Geokon (Geokon, s.d.). Este gráfico foi obtido em uma das experiências profissionais realizadas pelo autor desta dissertação.

Figura 37 – Sinal devolvido por um piezômetro de corda vibrante modelo 4500C da Geokon, medido e apresentado pela ferramenta de leitura VW Analiser da Campbell Scientific



Fonte: VW Analiser Campbell Scientific Brasil

Após analisar as referências supracitadas e complementarmente outras que também abordam o assunto, foram identificadas algumas características importantes relacionadas ao sinal emitido pelo sensor de corda vibrante. Estas características foram descritas por diversos autores no campo do condicionamento de sinais para sensores de corda vibrante.

Soni e Makwana (2017) destacaram que o sinal elétrico gerado pelo sensor de corda vibrante segue uma forma de onda senoidal, caracterizada por uma curva suave que se repete em intervalos regulares de tempo. Este padrão senoidal é comum em fenômenos de vibração harmônica.

Thompson e Chen (2019) observaram que o sinal de um sensor de corda vibrante apresenta um decaimento exponencial ao longo do tempo. Isto significa que a amplitude do sinal diminui gradualmente à medida que o tempo passa. Este decaimento pode ser atribuído a fatores como dissipação de energia na corda, resistência do meio ou presença de amortecimento no sistema.

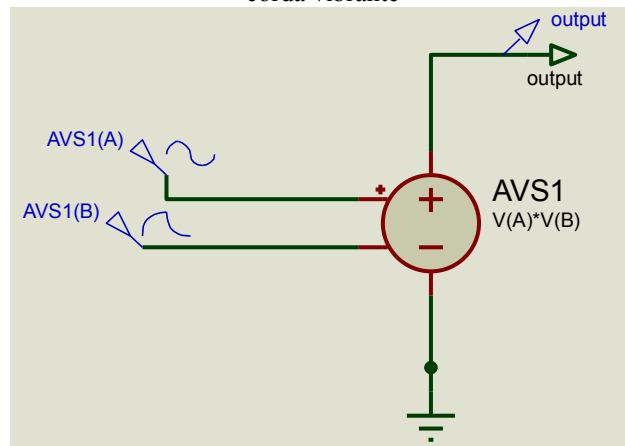
Rodriguez e Gupta (2020) ressaltaram que o sinal de um sensor de corda vibrante tem uma duração aproximada de 2 segundos. Este período compreende desde o início da excitação até o término do sinal completo. No entanto, vale ressaltar que esta duração pode variar dependendo de características específicas do sistema.

Zhang e Wang (2018) enfatizaram que a frequência do sinal gerado pelo sensor de corda vibrante corresponde à frequência de vibração da própria corda. Esta frequência está relacionada à frequência natural de ressonância da corda quando adequadamente excitada. A frequência de vibração depende de fatores como tensão, comprimento, massa linear e elasticidade da corda.

Com base nestas informações, foi realizada uma pesquisa nos componentes eletrônicos dos softwares Proteus 8 e MultSim, conforme mencionado no capítulo anterior. O objetivo era encontrar os elementos necessários para simular o sinal com as características descritas anteriormente. Durante esta busca identificou-se no software Proteus 8 o componente chamado *The Arbitrary Controlled Source Models*, o qual permite realizar operações com sinais elétricos e gerar um sinal de saída resultante.

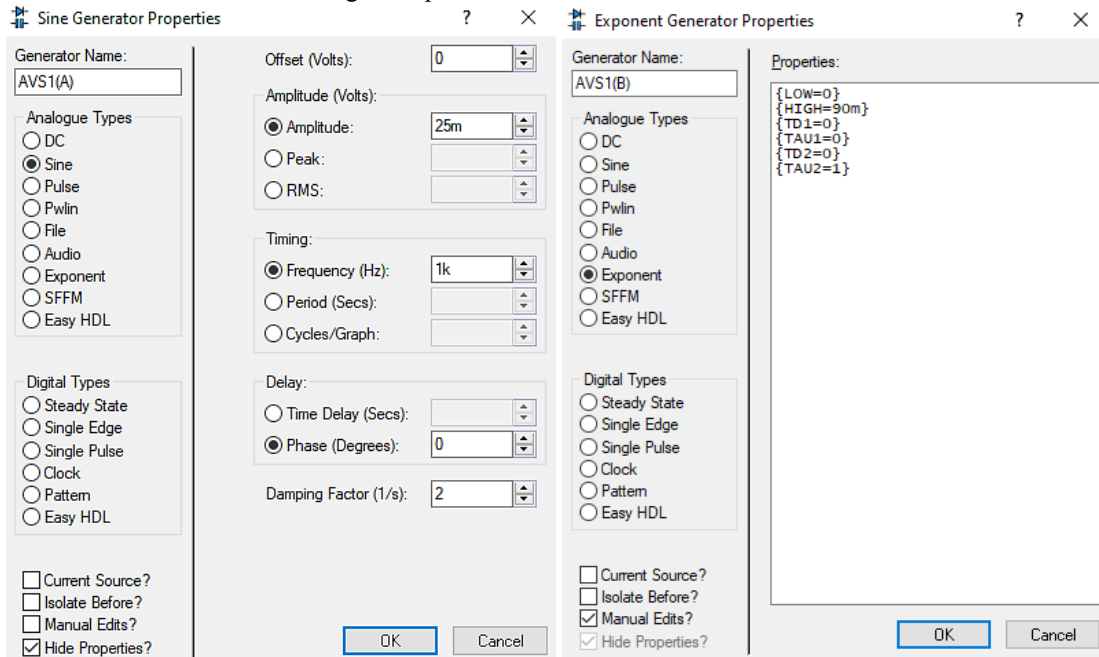
Por meio da utilização deste componente AVS1 e com base nos estudos mencionados acima, os sinais AVS1(A) e AVS1(B) foram multiplicados através do componente AVS1, gerando assim um sinal semelhante ao sinal do sensor de corda vibrante. A seguir na Figura 38 é apresentado o componente AVS1 com os sinais de entrada.

Figura 38 – Componente *The Arbitrary Controlled Source Models* utilizado para simular o sinal do sensor de corda vibrante



Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 39 – Parâmetros utilizados nos sinais de entrada do componente AVS1 com o intuito de simular o sinal gerado por um sensor de corda vibrante



Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

No software Proteus 8 foram utilizados parâmetros específicos para modelar um sinal senoidal no componente AVS1, a fim de simular o sinal emitido pelo sensor de corda vibrante. Estes parâmetros foram selecionados com base em suas características fundamentais, visando obter uma representação fiel do comportamento do sinal. A seguir são apresentadas as descrições dos parâmetros do sinal senoidal, mostrado na Figura 39, lado esquerdo, são eles:

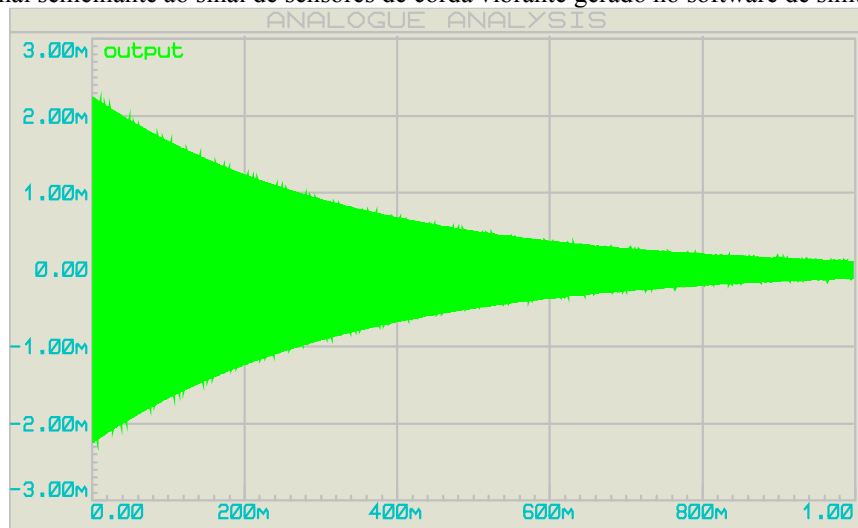
- **Amplitude:** define a altura máxima do sinal senoidal. No presente estudo, a amplitude foi estabelecida em 25 mV, indicando que o sinal varia entre +25 mV e -25 mV;
- **Frequency (Hz):** determina a frequência do sinal senoidal, ou seja, o número de ciclos completos que o sinal realiza por segundo. Neste caso, a frequência foi definida como 1 kHz, indicando que o sinal completa mil ciclos por segundo;
- **Phase (Degrees):** representa a fase inicial do sinal senoidal. Neste estudo, a fase foi estabelecida em 0 graus, indicando que o sinal inicia em sua posição inicial;
- **Offset (Volts):** adiciona um deslocamento vertical ao sinal senoidal. No presente trabalho, o offset foi ajustado para 0 volts, indicando que o sinal não sofre deslocamento vertical e passa pelo valor zero no eixo vertical.

Do mesmo modo, ao modelar um sinal exponencial no Proteus 8 também foram empregados parâmetros específicos para capturar as características desejadas. A Figura 39, lado direito, ilustra os parâmetros utilizados:

- LOW: define o valor mínimo do sinal exponencial. Neste estudo, o valor estabelecido foi 0;
- HIGH: determina o valor máximo do sinal exponencial. Foi adotado o valor de 90 ms, equivalente a 90 multiplicado por 10^{-3} (milissegundos);
- TD1: representa o tempo de atraso inicial antes que o sinal exponencial comece a aumentar. No presente contexto, o valor utilizado foi 0, indicando ausência de atraso inicial;
- TAU1: corresponde à constante de tempo que controla a taxa de crescimento do sinal exponencial. Para este estudo, o valor adotado foi 0, indicando que não há crescimento exponencial;
- TD2: indica o tempo de atraso antes que o sinal exponencial comece a diminuir. Neste caso foi utilizado o valor 0, indicando ausência de atraso antes da diminuição do sinal;
- TAU2: representa a constante de tempo que governa a taxa de decaimento do sinal exponencial. O valor adotado foi 1, o que significa que o sinal diminuirá exponencialmente ao longo do tempo, com uma taxa determinada por essa constante.

Utilizando o componente AVS1 e aplicando a operação de multiplicação " $V(A)*V(B)$ ", conforme ilustrado na Figura 38, os dois sinais caracterizados anteriormente, o sinal senoidal AVS1(A) e o sinal exponencial AVS1(B), foram multiplicados. Isto resultou em um sinal senoidal com decaimento exponencial, assemelhando-se ao sinal gerado pelo sensor de corda vibrante. A Figura 40 apresenta o sinal gerado, destacando-se que sua amplitude máxima está em torno de 2,5mV, similar ao sinal de um sensor real (Figura 37). Esta amplitude foi obtida a partir dos parâmetros dos dois sinais que foram multiplicados.

Figura 40 – Sinal semelhante ao sinal de sensores de corda vibrante gerado no software de simulação Proteus 8



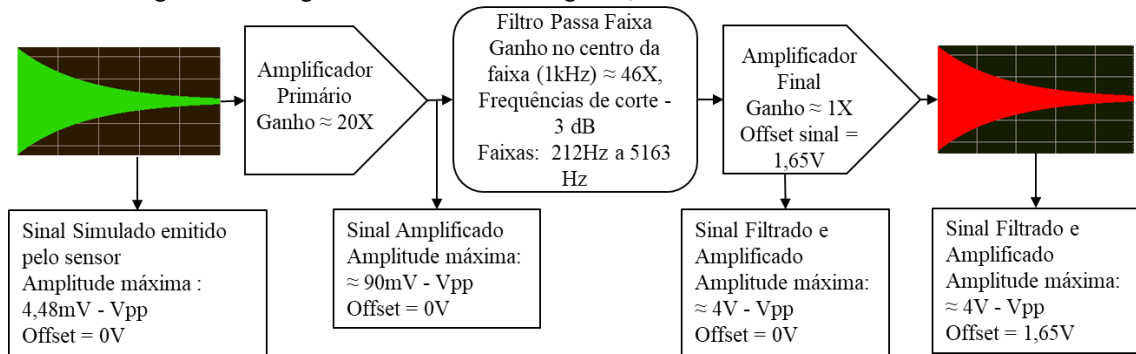
Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após o sucesso na simulação do sinal emitido pelos sensores de corda vibrante, foram realizadas simulações dos estágios do circuito de condicionamento. Inicialmente, as simulações foram elaboradas para os estágios de condicionamento do sinal gerado pelo sensor, deixando para um segundo momento a simulação do primeiro e do segundo estágio, ou seja, o circuito de excitação e o chaveamento do sinal, respectivamente.

Antes de iniciar as simulações dos circuitos que condicionam o sinal do sensor de corda vibrante foi necessário elaborar um diagrama em blocos para projetar a estrutura de ganho destes circuitos. Isto se deve ao fato de que a amplitude do sinal gerado pelo sensor é baixa, aproximadamente 4mV de pico a pico. Portanto, o circuito de condicionamento deve amplificar e ajustar este sinal para que ele atinja uma amplitude máxima de 3,3V, com um offset de 1,65V, tornando-o adequado para leitura pelo ESP32. Os parâmetros e condições do ESP32 já foram abordados anteriormente neste trabalho.

Desta maneira, foi criado o diagrama em blocos apresentado na Figura 40, que destaca as etapas de condicionamento de sinais 3, 4 e 5, referentes à Amplificação Primária, Filtro Passa-Faixa, Amplificação Final e Condicionamento, respectivamente. Estas etapas foram descritas detalhadamente no item 3.2.2 deste trabalho. Os valores de ganho para cada estágio foram estabelecidos arbitrariamente, com exceção das características do filtro passa-faixa, que foi projetado com as especificações necessárias para atender ao projeto. Os valores apresentados na Figura 41 para o filtro passa-faixa são resultados gerados pelo software da Texas Instruments (s.d.) que disponibiliza uma ferramenta on-line para projetos de filtros ativos. Os detalhes deste projeto, assim como suas características, serão abordados com mais detalhes posteriormente.

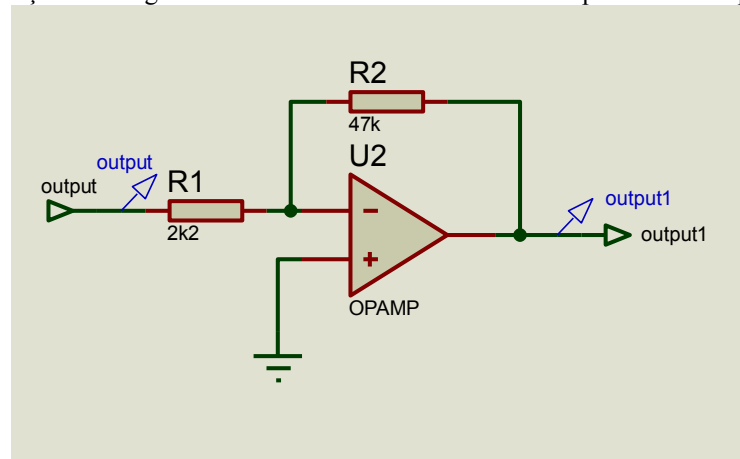
Figura 41 – Diagrama em bloco dos estágios 3, 4 e 5 de condicionamento de sinais



Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

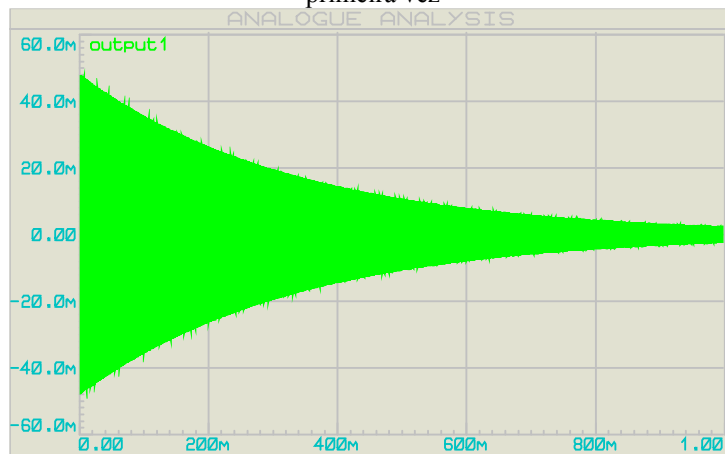
Foram realizadas simulações individuais dos estágios mencionados anteriormente, levando-se em consideração os ganhos e as características definidas. A Figura 42 apresenta a simulação do estágio 3 – Amplificação primária, utilizando um amplificador operacional ideal disponível como componente no software Proteus 8. Neste estágio, o amplificador operacional foi configurado na configuração inversora, utilizando dois resistores. A escolha dos valores destes resistores resultou no ganho esperado de aproximadamente 20 vezes. Sendo mais específico, o sinal obteve um ganho de 21,36 vezes, resultando em um sinal de amplitude máxima de aproximadamente 95,6 mVpp. O resultado da amplificação pode ser observado na Figura 43, onde o sinal foi amplificado.

Figura 42 – Simulação do estágio 3 de condicionamento de sinal correspondente à amplificação primária



Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 43 – Sinal da Figura 39 após passar pelo estágio 3 de condicionamento e ter seu sinal amplificado pela primeira vez



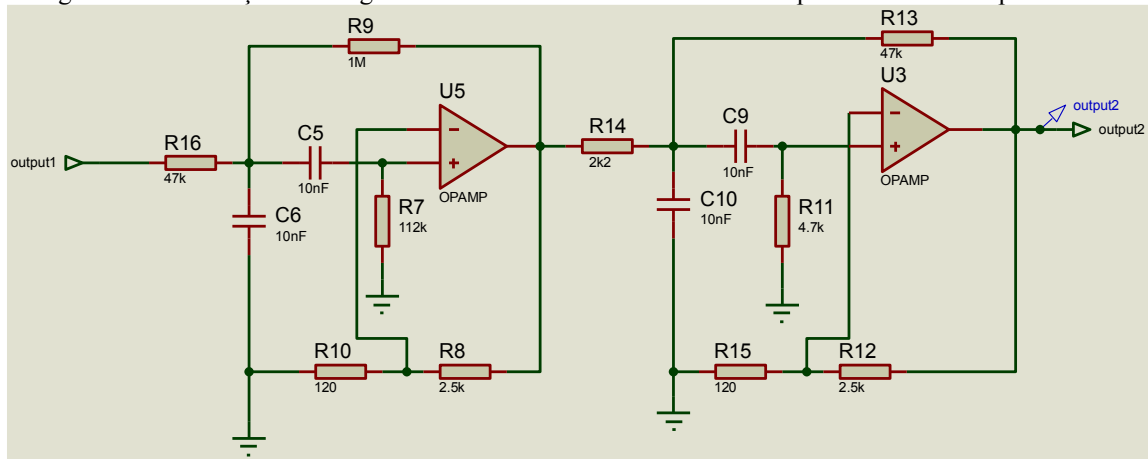
Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

A simulação do estágio 4 de condicionamento de sinais, referente ao filtro passa-faixa. O objetivo deste estágio é filtrar o sinal proveniente dos sensores de corda vibrante após terem seu sinal amplificado no estágio anterior (3), permitindo a passagem apenas das frequências desejadas, eliminando assim ruídos indesejados, como interferências provenientes de rede elétrica, ou até mesmo de sistemas de telecomunicações. Para elaborar este estágio utilizou-se como referência os dados apresentados na Tabela 8.

Conforme o diagrama em blocos, também definiu-se um ganho de aproximadamente 46 vezes para o filtro passa-faixa. Para a realização do projeto deste filtro foi empregada a ferramenta on-line Filter-Pro, disponibilizada pela Texas Instruments. Nesta plataforma foram inseridos os parâmetros definidos para o filtro, resultando na geração do projeto do filtro com a indicação dos componentes necessários. Posteriormente, alguns valores de componentes foram ajustados, considerando aproximações comerciais. O filtro foi então simulado utilizando o software Proteus 8 e é apresentado na Figura 44, bem como o seu respectivo resultado no domínio da frequência ilustrado na Figura 45.

É importante destacar que o ganho de 46 vezes foi arbitrado levando em consideração a amplitude do sinal gerado pelos sensores de corda vibrante, que pode ser inferior a 4 mVpp em alguns casos. Ao estabelecer este ganho buscou-se não apenas filtrar o sinal, mas também aproveitar a oportunidade para amplificá-lo. Desta forma, o projeto do filtro passa-faixa valoriza a métrica de custo, uma vez que os componentes utilizados no filtro também desempenham um papel na amplificação do sinal.

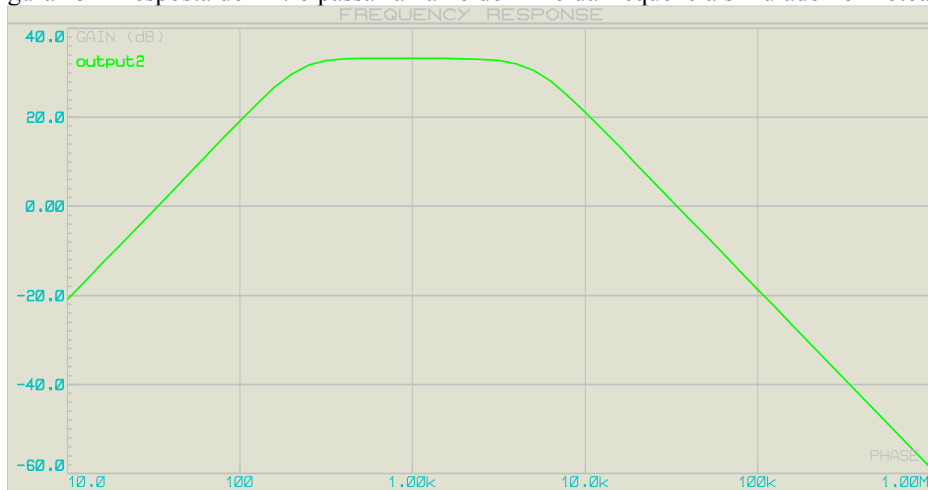
Figura 44 – Simulação do estágio 4 de condicionamento de sinal correspondente ao Filtro passa-faixa



Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

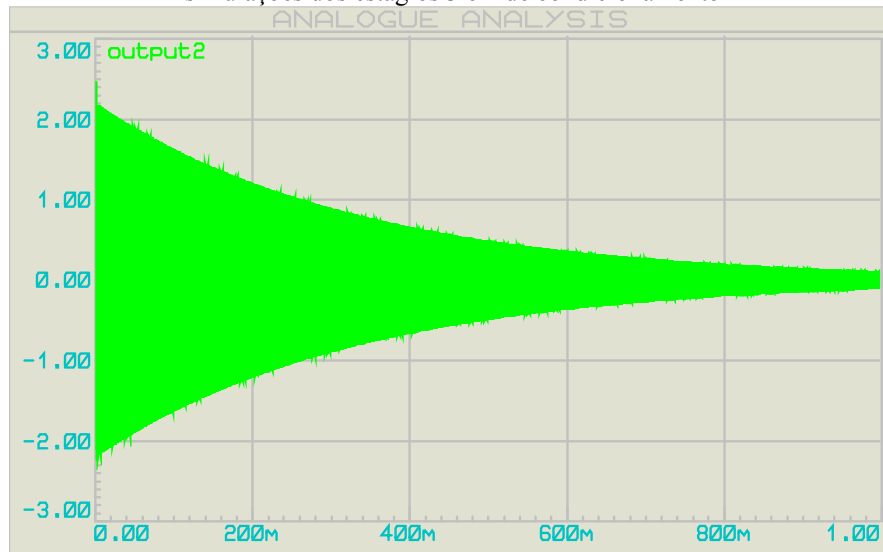
O filtro gerado pelo software da Texas Instruments possui uma resposta Butterworth de 4ª ordem, estipulado na entrada dos dados, e a topologia adotada para sua implementação é a Sallen-Key, sugerida pelo software. O ganho do filtro gerado chegou a aproximadamente 33dB no centro da faixa, o que chega próximo das 46 vezes estipuladas, as frequências de corte inferior e superior, respectivamente, ficaram em 212 Hz e 5163 Hz com o corte em -3 dB. Como mencionado anteriormente, a Figura 45 a seguir apresenta a resposta do filtro no domínio da frequência e, por fim, na Figura 46 é apresentado o sinal após passar pelos estágios 3 e 4, amplificação primária e filtragem respectivamente.

Figura 45 – Resposta do Filtro passa-faixa no domínio da frequência simulado no Proteus 8



Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

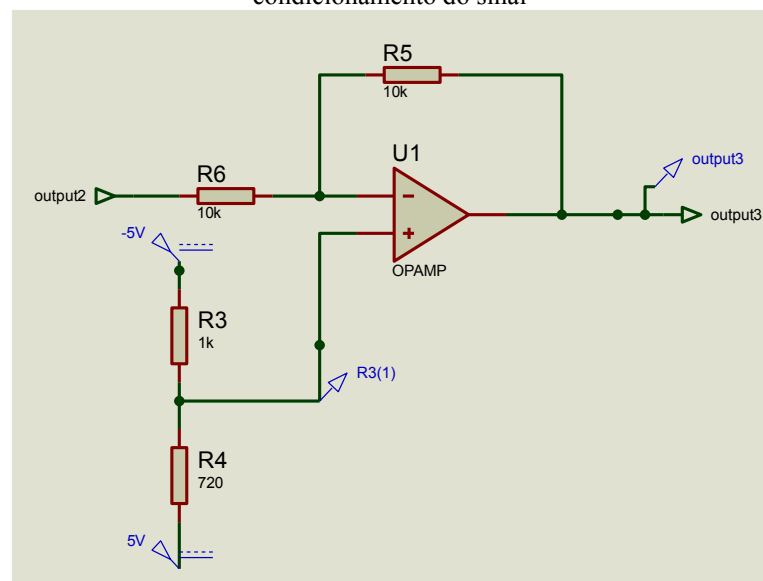
Figura 46 – Sinal similar ao do emitido pelo sensor de corda vibrante, simulado do Proteus 8, após passar pelas simulações dos estágios 3 e 4 de condicionamento



Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

Por fim, para concluir as simulações conforme descritas no diagrama em blocos apresentado na Figura 41, foi realizada a simulação do estágio 5 (Figura 47) de condicionamento, denominado "amplificação final e condicionamento" mostrado na Figura 47. Neste estágio, o objetivo é fornecer um ganho unitário ao sinal e ajustar o offset para um valor específico de 1,65V. Para alcançar este propósito foi utilizado um amplificador operacional ideal configurado na forma inversora, com dois resistores de igual valor para obter o ganho unitário.

Figura 47 – Simulação do estágio 5 de condicionamento de sinal correspondente à Amplificação Final e condicionamento do sinal

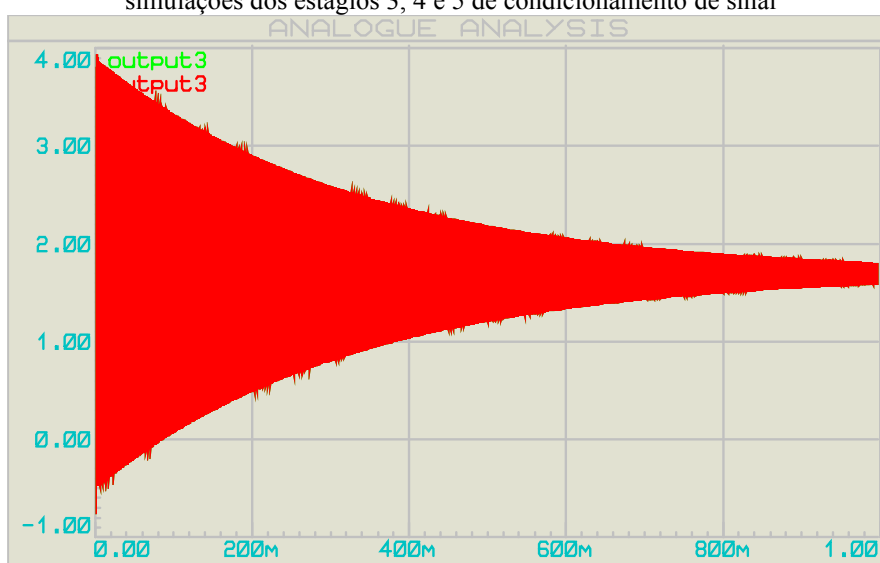


Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

Além disto, na entrada não inversora, foi empregado um divisor de tensão com alimentação simétrica, aproveitando as características dos amplificadores operacionais, que tendem a igualar as tensões de entrada com a saída. Os valores dos resistores do divisor resistivo foram seleccionados de maneira a ajustar o offset do sinal proveniente do estágio 3, o filtro passa-faixa, para o valor desejado de 1,65V.

O sinal resultante, após percorrer os estágios 3, 4 e 5, foi obtido por meio da simulação e pode ser observado na Figura 48, conforme ilustrado a seguir.

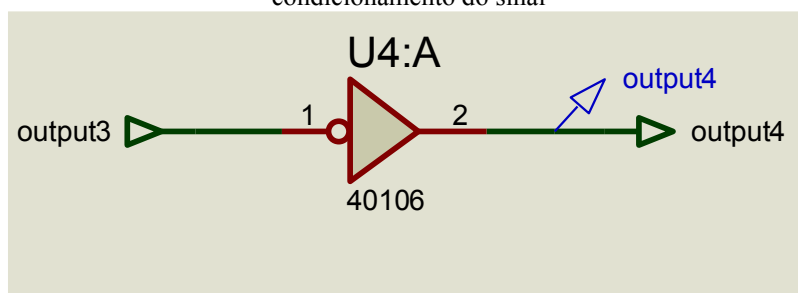
Figura 48 – Sinal similar ao do emitido pelo sensor de corda vibrante, simulado do Proteus 8, após passar pelas simulações dos estágios 3, 4 e 5 de condicionamento de sinal



Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

Por fim, simulou-se o estágio 6, que envolve o gatilho Schmitt (Schmitt Trigger). Para a simulação utilizou-se o circuito integrado muito popular e comumente encontrado, o CI CD40106. Como não foi encontrado um módulo genérico para este componente (gatilho Schmitt) no Proteus 8, optou-se por utilizar o CI mencionado, também pela facilidade de aquisição. A Figura 49 mostra a simulação do circuito do estágio 6, seguida da Figura 50 que exhibe o sinal simulado no Proteus após passar por todas as etapas de condicionamento de sinais. O sinal resultante é uma forma de onda quadrada com a mesma frequência e formato do sinal gerado, pronto para ser lido por um microcontrolador.

Figura 49 – Simulação do estágio 5 de condicionamento de sinal correspondente à Amplificação Final e condicionamento do sinal



Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 50 – Sinal resultante depois de passar por todos os estágios de condicionamento



Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

É importante ressaltar que o sinal gerado pelo gatilho Schmitt é uma forma de onda com amplitude de 5Vpp e um offset de 2,5V. Deste modo, este sinal não é adequado para leitura pelo ESP32. Isto ocorre porque o componente CD40106 do Proteus 8 não permite a alimentação adequada deste circuito integrado. A amplitude máxima do sinal quadrado gerado pelo CD40106 será limitada pela tensão de alimentação, que no caso deste módulo é de 5Vcc por padrão. Nas próximas simulações com os componentes reais, esta limitação será abordada e solucionada.

Após realizar a simulação de todas as etapas de condicionamento de sinais, a atenção voltou-se para as simulações do Circuito de Excitação. Conforme mencionado anteriormente, o circuito de excitação desempenha um papel fundamental ao preparar o sinal de excitação gerado pelo microcontrolador e aplicá-lo ao sensor. Neste sentido, foram analisados os artigos referenciados no Capítulo 2, item 2.4, não apenas com o objetivo de obter referências de

circuitos de excitação previamente utilizados, mas também para caracterizar o sinal de excitação a ser aplicado ao sensor.

Dentre os trabalhos mencionados no Capítulo 2, item 2.4, publicados a partir de 2010 até o presente momento, prevalece um consenso conceitual acerca da eficácia do método de excitação conhecido como *Variable frequency pulse trains* na estimulação de sensores de corda vibrante.

A técnica de *Variable frequency pulse trains* refere-se a um método de excitação em que o sinal de excitação possui uma sequência de pulsos (onda quadrada) com frequências variáveis ao longo do tempo. O estudo conduzido por Guerrero, Vicente e Gortari (2016) enfatiza que esta técnica se destaca também pela facilidade de geração destes sinais de excitação, tornando-a altamente viável e eficaz em aplicações práticas. A sua implementação simplificada contribui para resultados mais confiáveis, possibilitando aprimorar a precisão das medições realizadas e garantir uma caracterização mais precisa do comportamento do sensor.

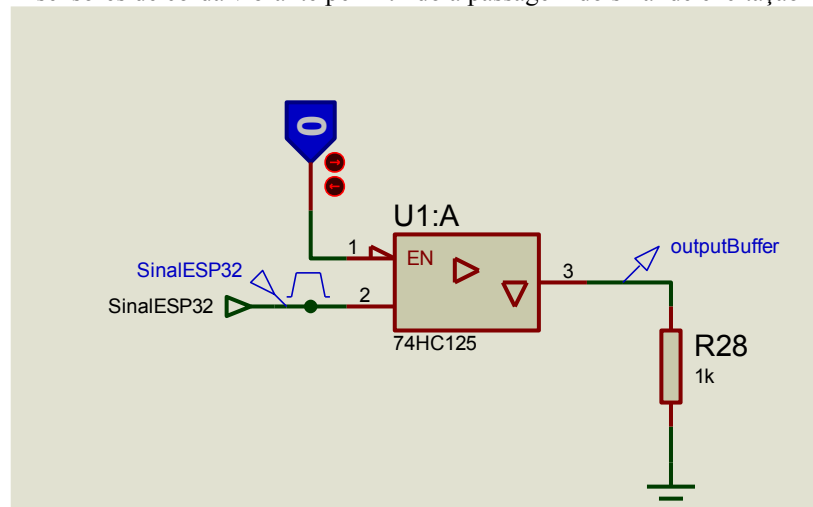
Neste contexto, a simulação conceitual do circuito de excitação envolveu o desenvolvimento de um buffer com o propósito de amplificar a corrente do sinal de pulso gerado pelo microcontrolador ESP32. Além disto, o buffer foi projetado para aumentar a impedância de saída do dispositivo que se conectará diretamente ao sensor, garantindo a qualidade do sinal de excitação fornecido.

Considerando que o sinal de excitação será um sinal quadrado com variação de frequência, foi simulado um buffer digital para manipulação deste sinal. Esses buffers digitais são circuitos que geralmente possuem um controle de direcionamento, conhecido como bit de chaveamento, que permite controlar a passagem ou bloqueio do sinal pelo componente.

No entanto, no simulador Proteus 8 não havia um circuito de buffer digital ideal disponível para representar este circuito específico. Portanto, optou-se por utilizar o bloco do circuito integrado 74HC125, amplamente utilizado e facilmente adquirido no Brasil, que possui o controle de direcionamento necessário.

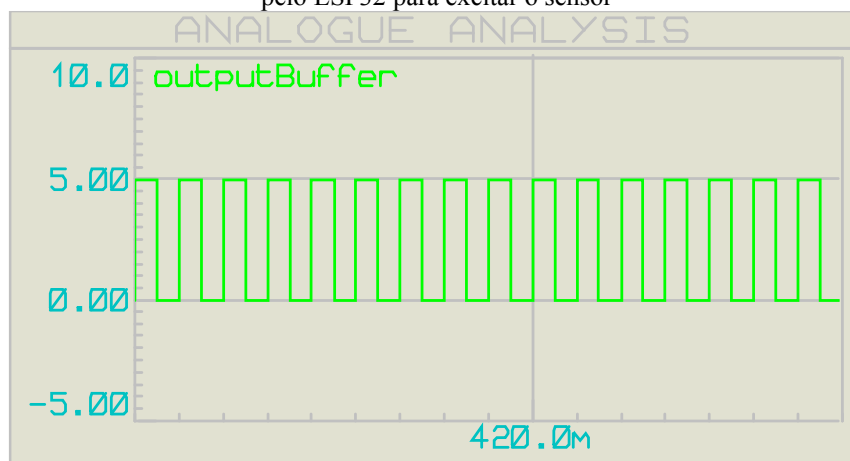
A Figura 51 apresenta o circuito de excitação conceitual modelado, com o bit de controle definido como 0 (zero), permitindo a passagem do sinal, conforme mostrado na Figura 52. Por outro lado, a Figura 53 mostra o mesmo circuito de excitação, porém, com o bit de controle definido como 1 (um), bloqueando a passagem do sinal e resultando no gráfico mostrado na Figura 54.

Figura 51 – Simulação conceitual do circuito de excitação da placa de condicionamento de sinais para ler sensores de corda vibrante permitindo a passagem do sinal de excitação



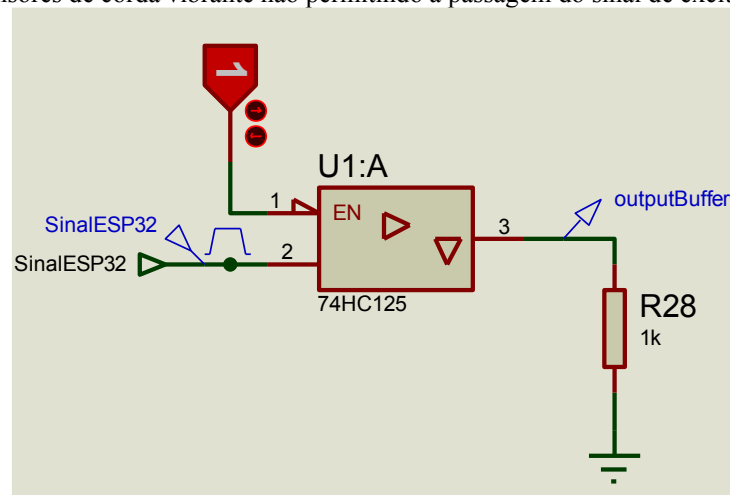
Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 52 – Sinal de saída do buffer, idêntico ao de entrada que tem o intuito de simular o sinal que será gerado pelo ESP32 para excitar o sensor



Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 53 – Simulação conceitual do circuito de excitação da placa de condicionamento de sinais para ler sensores de corda vibrante não permitindo a passagem do sinal de excitação



Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 54 – Sinal de saída do buffer cortado pelo bit de controle



Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

O último estágio simulado abordou o estágio 2 de chaveamento dos sinais. Devido ao fato de que o sinal de excitação e o sinal de resposta do sensor são transmitidos pelo mesmo condutor, é necessário realizar o chaveamento dos sinais para isolar os dois circuitos. É importante ressaltar que durante a pesquisa realizada para o desenvolvimento dos dispositivos, a literatura consultada não abordou de forma clara e abrangente este estágio, embora seja de grande importância para o sistema em questão.

Desta forma, para realizar o chaveamento adequado desses sinais, é necessário utilizar uma chave eletrônica analógica. Esta escolha se justifica pela necessidade de chavear sinais analógicos que trafegarão pelo sistema. É fundamental garantir que o chaveamento seja realizado de forma eficiente para evitar interferências indesejadas entre os sinais e assegurar o correto funcionamento do sistema.

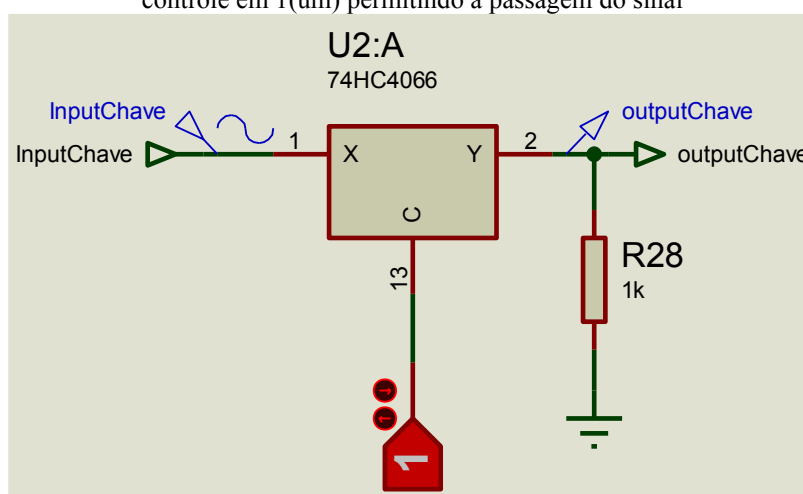
Desta forma, durante a pesquisa realizada no software Proteus 8 utilizando as palavras-chave "chave analógica" ou "multiplexador analógico", com o intuito de encontrar uma chave analógica com comportamento ideal para a simulação, não foi encontrado nenhum componente adequado. No entanto, o resultado da pesquisa no Proteus 8 apresentou o circuito integrado (CI) 74HC4066, o qual é amplamente utilizado como uma chave analógica em circuitos eletrônicos e é facilmente adquirido no Brasil.

Diante disto, o CI 74HC4066 foi selecionado para realizar a simulação do circuito. Um sinal senoidal foi aplicado na entrada e o bit de controle da chave foi variado, possibilitando a observação do comportamento esperado do circuito. A Figura 55 exibe a simulação do circuito com o bit de controle em nível lógico alto (1), permitindo a passagem do sinal, e o resultado é mostrado na Figura 56. Por outro lado, a Figura 57 apresenta a simulação com o bit de controle

em nível lógico baixo (0), bloqueando a passagem do sinal analógico, como mostrado na Figura 58.

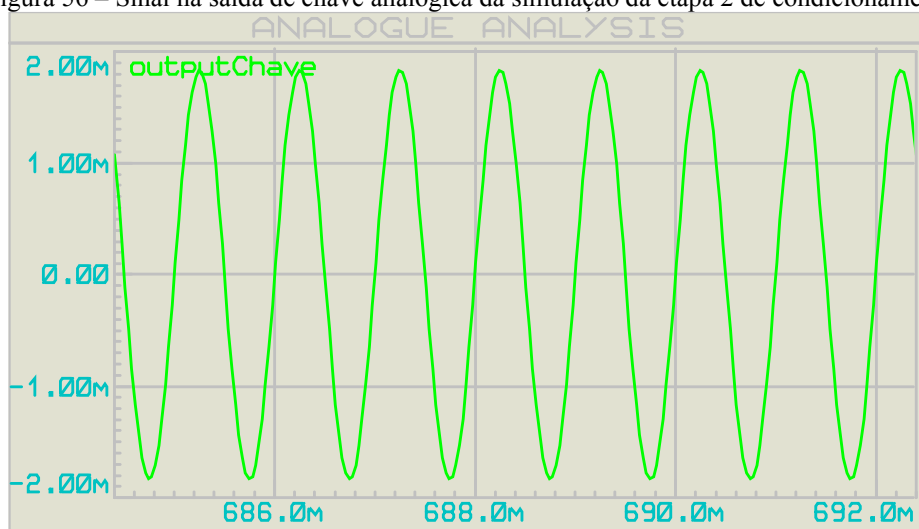
Vale ressaltar que o sinal aplicado à chave possui uma amplitude de 4Vpp (pico a pico), sendo esta amplitude escolhida para simular o chaveamento do sinal de acordo com a mesma amplitude que o sensor de corda vibrante gera. Esta seleção foi realizada com o propósito de reproduzir a situação real de utilização da chave no circuito desenvolvido.

Figura 55 – Simulação da Etapa 2 de condicionamento da Placa de condicionamento de sinais com o bit de controle em 1(um) permitindo a passagem do sinal



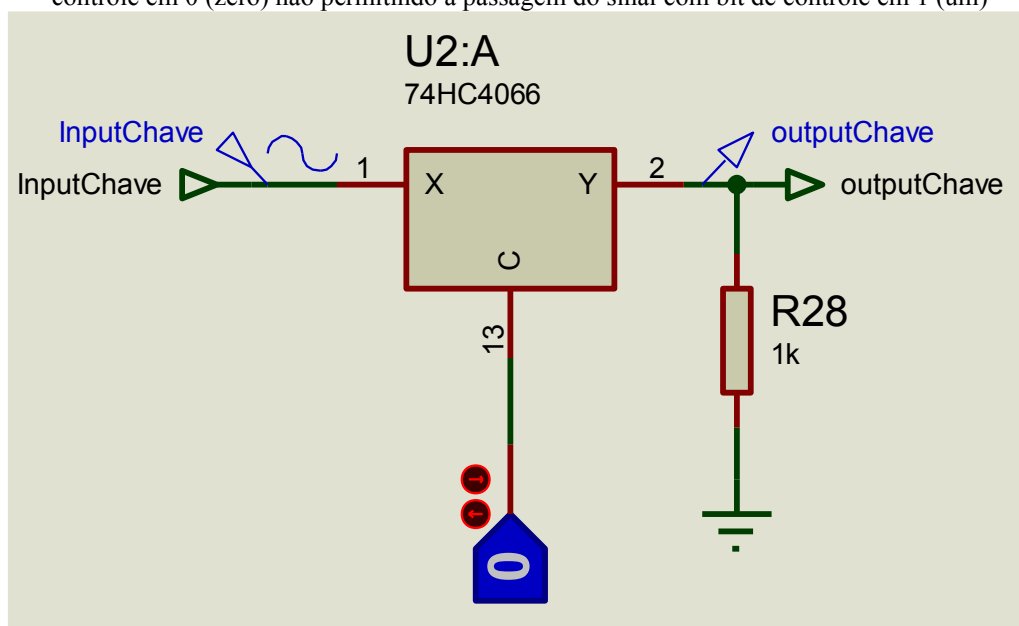
Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 56 – Sinal na saída de chave analógica da simulação da etapa 2 de condicionamento



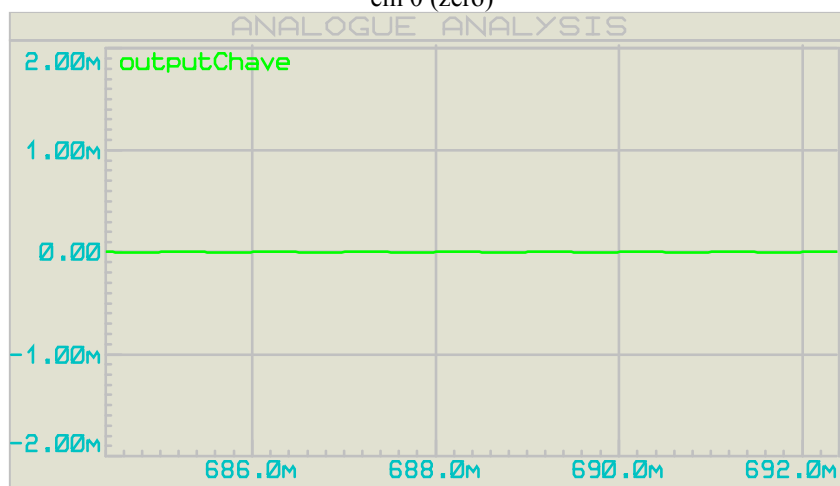
Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 57 – Simulação da Etapa 2 de condicionamento da Placa de condicionamento de sinais com o bit de controle em 0 (zero) não permitindo a passagem do sinal com bit de controle em 1 (um)



Fonte: Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 58 – Sinal na saída de chave analógica da simulação da etapa 2 de condicionamento com bit de controle em 0 (zero)



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após a concepção e simulação de todas as etapas de condicionamento de sinais no software Proteus 8, a funcionalidade de cada estágio foi validada, demonstrando um desempenho satisfatório. Com base nesta validação, os componentes adequados foram selecionados para compor cada etapa do processo de condicionamento de sinais.

3.2.2.2 Escolha dos componentes para compor a placa de condicionamento de sinais

Após a realização das simulações iniciais de todas as etapas dos circuitos, foi conduzida uma seleção criteriosa com base na aplicação e nas características técnicas de cada dispositivo. A primeira etapa consistiu em definir o tipo de dispositivo eletrônico necessário para cada estágio. A seguir estão listados os principais componentes necessários para o desenvolvimento da placa em cada estágio:

1. Circuito de excitação – Circuito Buffer;
2. Chaveamento do sinal – Chave eletrônica analógica;
3. Amplificação primária – Amplificador Operacional de instrumentação;
4. Filtro passa-faixa – Amplificadores operacionais;
5. Amplificação Final e Condicionamento – Amplificador operacional;
6. Estágio de retificação (opcional) – Circuito integrado com Schmidt trigger.

Após a definição dos dispositivos principais para cada estágio, foram estabelecidas métricas para a escolha de cada um deles. Estas métricas foram desenvolvidas em consonância com as métricas consideradas para a "Placa Universal".

As métricas estabelecidas para o estágio 1 são: baixo custo, baixo consumo de energia, baixa impedância de entrada, alta impedância de saída, compatibilidade com as tensões disponíveis na "Placa Universal" (3.3Vcc, 5Vcc, 12Vcc) e facilidade de aquisição do componente no Brasil.

Para compor o estágio 1 – Circuito de excitação foram selecionados alguns componentes para integrar esta etapa, levando-se em consideração as métricas anteriormente mencionadas. Entre eles estão: 74HCT125, 74HCT244, 74HCU04 e 74HC245, todos adequados para serem utilizados como buffer digital. Estes componentes foram analisados considerando as métricas estipuladas, e o 74HC245 se destacou. Ele atende às exigências de alimentação, podendo ser alimentado com até 6 V. Além disto, este componente possui não apenas o bit de controle de direcionamento, mas também um bit de controle de enable, que aciona ou interrompe o sinal, independentemente da direção em que ele esteja.

O 74HC245 possui o controle de enable, o qual, quando o direcionamento do sinal está definido, permite controlar a passagem do sinal. Ao bloquear o sinal, ele coloca todas as saídas em estado de alta impedância (tri-state), o que resulta em uma impedância de saída muito alta, ideal para a aplicação em questão.

Por fim, a facilidade de aquisição e a ampla disponibilidade do 74HC245 em laboratórios de eletrônica, incluindo o LITE Coltec, onde os dispositivos foram desenvolvidos, também contribuíram para a escolha deste componente.

Para o estágio 2 foi necessário selecionar um componente para atuar como comutador analógico e digital. Para isto é necessário levar em consideração várias métricas importantes. No caso específico, as métricas a serem consideradas são baixo custo, baixo consumo de energia, velocidade de chaveamento, ruídos de chaveamento, compatibilidade com as tensões disponíveis na "Placa Universal" (3.3Vcc, 5Vcc, 12Vcc) e facilidade de aquisição do componente no Brasil.

Após uma análise criteriosa levando-se em conta estas métricas, o CD4066 se destaca como uma escolha viável e com benefícios.

Em relação ao custo, o CD4066 é uma opção acessível, oferecendo um bom equilíbrio entre preço e desempenho. Isto torna a escolha vantajosa, especialmente quando se considera projetos com restrições de orçamento.

Outro ponto relevante é o baixo consumo de energia oferecido pelo CD4066. Com uma corrente de operação típica de apenas alguns microamperes, este componente contribui para a eficiência energética do sistema, especialmente em aplicações com restrições de energia.

A velocidade de chaveamento é uma métrica importante em muitas aplicações. O CD4066 apresenta um tempo de comutação razoável, permitindo transições rápidas entre os estados, o que é crucial para o desempenho do circuito.

O ruído de chaveamento também é um fator crítico a ser considerado, especialmente em aplicações sensíveis. O CD4066 oferece um bom desempenho neste aspecto, minimizando os efeitos indesejados de ruídos durante o processo de comutação.

Ademais, o CD4066 é compatível com as tensões disponíveis na "Placa Universal", permitindo sua integração perfeita em diferentes sistemas. Com suporte para tensões de 3.3Vcc, 5Vcc e 12Vcc, este componente oferece flexibilidade de aplicação em uma variedade de projetos.

Por fim, a facilidade de aquisição é um fator crucial. O CD4066 é amplamente disponível no mercado brasileiro, tornando sua obtenção fácil e rápida. Isto é especialmente benéfico para projetos em que é necessário obter os componentes localmente.

Desta forma, considerando as métricas de baixo custo, baixo consumo de energia, velocidade de chaveamento, ruídos de chaveamento, compatibilidade com as tensões disponíveis na "Placa Universal" e facilidade de aquisição no Brasil, o CD4066 se destaca como a escolha viável para atuar como comutador analógico e digital no projeto em questão.

A avaliação dos estágios 3, 4 e 5 foi conduzida de forma conjunta, considerando suas particularidades e métricas relevantes para a escolha dos amplificadores operacionais a serem utilizados em cada estágio. Embora o estágio 3 exija um amplificador de instrumentação para amplificar um sinal de baixa amplitude, as métricas consideradas para a seleção dos amplificadores operacionais nos demais estágios são semelhantes.

A seguir estão apresentadas as principais métricas definidas para a escolha dos amplificadores operacionais nos estágios 3, 4 e 5:

- Ganho de Tensão de Malha Aberta (Open-Loop Voltage Gain): o ganho de tensão de malha aberta é uma medida do poder de amplificação que um amplificador operacional pode fornecer nas condições ideais, ou seja, sem a aplicação de realimentação;
- Largura de Banda (Bandwidth): a largura de banda de um amplificador operacional é a faixa de frequências em que ele pode operar efetivamente sem uma degradação significativa no ganho;
- Impedância de Entrada (Input Impedance): a impedância de entrada de um amplificador operacional é a resistência elétrica que ele apresenta à fonte de sinal conectada à sua entrada;
- Impedância de Saída (Output Impedance): a impedância de saída é a resistência elétrica que o amplificador operacional apresenta à carga conectada à sua saída;
- Corrente de Bias (Bias Current): a corrente de bias é a corrente contínua que flui dentro do amplificador operacional;
- Rejeição de Modo Comum (Common-Mode Rejection): a rejeição de modo comum é a capacidade do amplificador operacional de rejeitar os sinais de modo comum, que são aqueles que aparecem de forma idêntica nas duas entradas;
- Taxa de Subida (Slew Rate): a taxa de subida é a velocidade máxima na qual o amplificador operacional pode responder a uma variação brusca na entrada.
- Custo: o custo é uma métrica importante que está relacionada ao preço do amplificador operacional. É necessário buscar um equilíbrio entre o desempenho necessário e o custo do dispositivo;
- Tensão de Alimentação: a tensão de alimentação é a faixa de tensão de entrada requerida pelo amplificador operacional para operar corretamente. É essencial escolher um amplificador operacional que seja compatível com a tensão de alimentação disponível na "Placa Universal".

Inicialmente foram selecionados os seguintes amplificadores operacionais: AD620, INA333, OP07, LM741, LM358. A escolha do amplificador operacional AD620 para compor o estágio de amplificação primária (Estágio 3) é justificada com base em critérios e premissas de aplicação específicos. O AD620 é classificado como um amplificador de instrumentação, caracterizando-se por sua capacidade de amplificar sinais de baixa amplitude com alta precisão e rejeição de ruído. Sua faixa de ganho de tensão ajustável, que varia de 1 a 1000, permite a amplificação adequada do sinal de entrada.

Dentre os critérios considerados, a alta impedância de entrada do AD620, que alcança 10 G Ω , é uma vantagem significativa para evitar a degradação do sinal e minimizar a interferência, especialmente em aplicações sensíveis e de baixo nível de sinal. Além disto, a ampla faixa de tensão de alimentação, que varia de $\pm 2,3$ V a ± 18 V, oferece flexibilidade na adaptação às necessidades do sistema.

No contexto do estágio de filtro passa-faixa (Estágio 4) e amplificação final e condicionamento (Estágio 5), o amplificador operacional OP07 foi selecionado com base em critérios de desempenho e custo. O OP07 é reconhecido como um amplificador operacional de precisão, que oferece características ideais para aplicações que demandam uma resposta em frequência ampla e uma alta rejeição de ruído de modo comum.

Com uma largura de banda que varia de 0,3 Hz a 10 MHz e uma rejeição de modo comum que abrange de 94 dB a 120 dB, o OP07 atende aos requisitos de resposta em frequência e capacidade de suprimir sinais indesejados. A faixa de tensão de alimentação do OP07, que varia de ± 3 V a ± 18 V, é adequada para a integração com o sistema e permite sua utilização em uma variedade de aplicações.

O OP07 também se destaca entre os amplificadores mais acessíveis em termos de custo, tornando-o uma escolha vantajosa em projetos que buscam um equilíbrio entre desempenho e orçamento.

Em resumo, a escolha do AD620 para o estágio de amplificação primária e do OP07 para os estágios de filtro passa-faixa e amplificação final e condicionamento baseou-se em critérios como ganho de tensão, largura de banda, impedância de entrada e saída, corrente de bias, rejeição de modo comum, slew rate, custo e faixa de tensão de alimentação. Estes amplificadores atendem às premissas de aplicação, fornecendo desempenho adequado e eficiente para as respectivas funções dentro do circuito.

O estágio final, estágio 6, requer um componente que seja capaz de converter o sinal analógico filtrado, amplificado e condicionado pelos estágios anteriores em um sinal digital,

mantendo a frequência. Para esta função, nas simulações conceituais foi utilizado o componente CD40106 como substituto de um bloco ideal.

O componente CD40106 foi selecionado devido à sua adequação às métricas de custo, consumo de energia e velocidade de chaveamento. Além do mais, o componente estava disponível no laboratório LITE Coltec, o que facilitou sua escolha.

O CD40106 é um circuito integrado que contém um conjunto de portas lógicas Schmitt trigger. Estas portas têm a capacidade de converter um sinal analógico em um sinal digital com base em um limiar de tensão. Elas possuem uma histerese interna que melhora a rejeição de ruídos e a estabilidade da transição do sinal.

Após a seleção dos componentes para cada estágio, foram realizadas simulações utilizando o software de simulação eletrônica MultSim 14. A escolha deste software se deu devido à sua robustez e alta performance como simulador, além da disponibilidade de componentes que se assemelham aos dispositivos reais. Um exemplo é a utilização do osciloscópio Tektronix nas simulações.

O MultSim 14 é um software amplamente utilizado na área de eletrônica para simulação de circuitos. Ele oferece uma ampla variedade de componentes virtuais que permitem modelar e simular o comportamento de dispositivos eletrônicos de forma precisa. O uso do osciloscópio Tektronix como parte das ferramentas disponíveis no MultSim 14 permitiu a visualização e análise detalhada dos sinais simulados, proporcionando uma experiência próxima à utilização de dispositivos reais.

3.2.2.3 – Simulações da Placa de condicionamento de sinais com os componentes definidos

Após a seleção dos componentes, foram conduzidas simulações com o objetivo de validar o comportamento dos componentes escolhidos e dos estágios nos quais esses componentes foram empregados. Conforme mencionado anteriormente, as simulações foram realizadas no simulador MultSim 14.

A primeira simulação abordou a etapa 1 de condicionamento, que diz respeito ao circuito de excitação. Nesta etapa foi utilizado o circuito integrado 74HC245, previamente selecionado. Para esta simulação configurou-se a chave S1 juntamente com um resistor de Pull-Down, a fim de garantir um nível lógico baixo na entrada $\sim G$, que corresponde à entrada Enable do 74HC245. O pino DIR foi mantido constantemente em nível lógico alto, assegurando o sentido do sinal do lado A para o lado B do circuito integrado.

A Tabela 9 a seguir apresenta a lógica de controle do 74HC245 com os pinos G e DIR. Por meio da combinação de níveis lógicos, é possível determinar a direção do sinal e se a passagem do sinal está permitida ou não. Enquanto o pino G estiver em nível lógico baixo (0) e o pino DIR em nível lógico alto (1), a passagem do sinal será permitida do lado A para o lado B. No entanto, assim que o pino G for alterado para nível lógico alto (1), a saída B será isolada, resultando em alta impedância nos pinos. Esta condição é alcançada quando o pino DIR também estiver em nível lógico alto.

Tabela 9 – Tabela Verdade do CI 74HC245

Control Inputs		Operation
\overline{G}	DIR	
L	L	B data to A bus
L	H	A data to B bus
H	X	Isolation

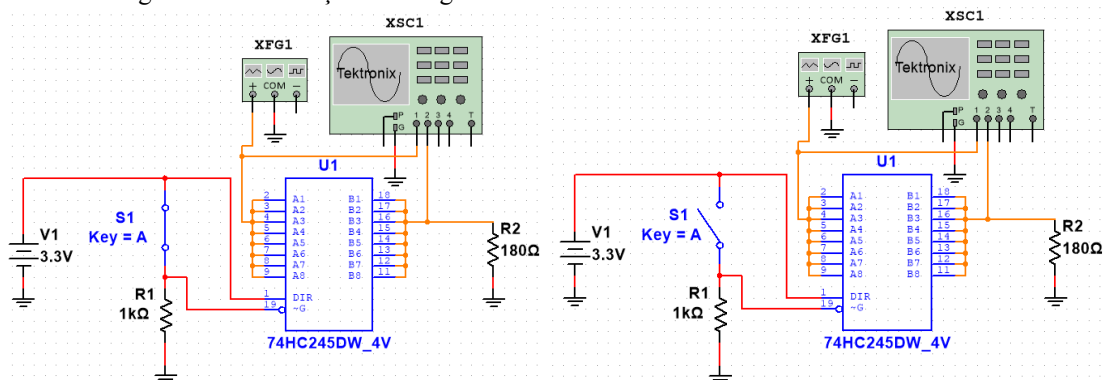
H = HIGH Level
L = LOW Level
X = Irrelevant

Fonte: datasheet CI 74HC245

Com base nas simulações anteriores e nos dados obtidos na Tabela 9, foram conduzidas simulações do estágio 1 de condicionamento. Estas simulações estão representadas na Figura 59, onde à esquerda é apresentada a simulação com a chave S1 em nível lógico alto, bloqueando a passagem do sinal; e à direita é exibida a simulação com a chave S1 em nível lógico baixo, permitindo a passagem do sinal. Os resultados das duas simulações podem ser observados na Figura 60.

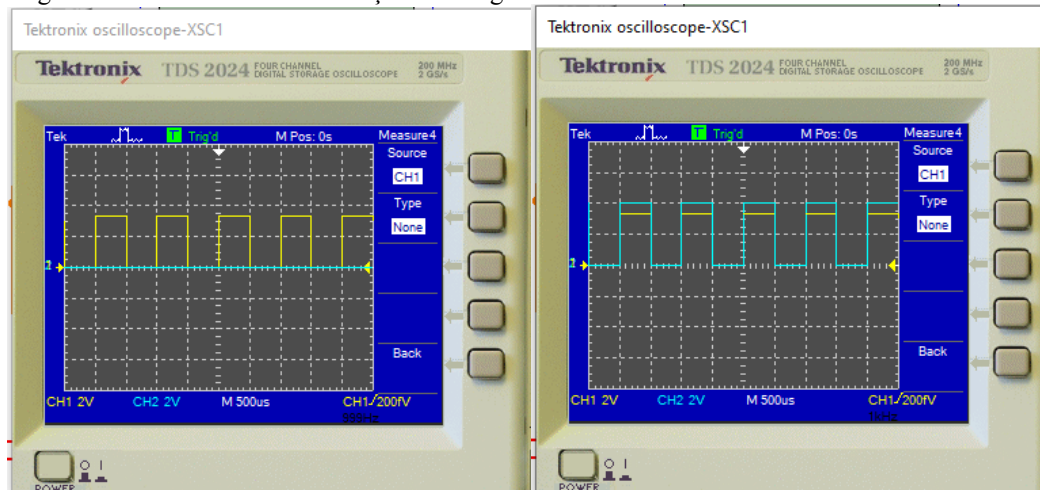
Na imagem à esquerda da Figura 60, é possível observar o sinal de saída bloqueado, representado pela curva azul. Já na imagem à direita, o sinal de saída está liberado. É importante destacar que a amplitude do sinal de saída, após passar pelo 74HC245, assume a amplitude de sua alimentação. Na simulação em questão, as alimentações dos componentes foram predefinidas, e o componente que mais se assemelha à situação real é aquele que possui uma alimentação de 4 V. Por este motivo, na imagem da direita da Figura 60, a amplitude do sinal de saída é de 4 Vpp. Nos testes de bancada, no entanto, este componente será alimentado com 3,3 V.

Figura 59 – Simulação do estágio 1 de condicionamento utilizando o CI 74HC245



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 60 – Resultados da simulação do estágio 1 de condicionamento utilizando o CI 74HC245



Fonte: Elaborado pelo Autor.

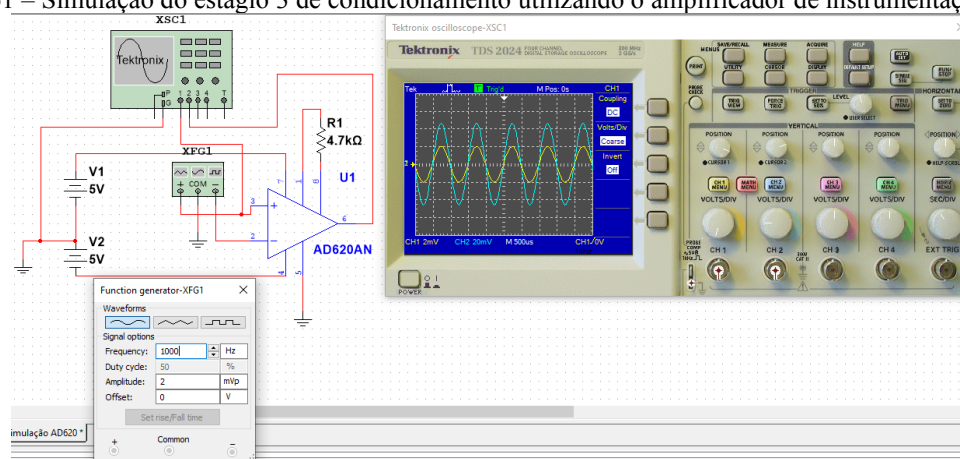
Não foram realizadas novas simulações utilizando o MultSim 14 para o estágio 2 de condicionamento. Em vez disso, dado que as simulações anteriores, realizadas no item 3.2.2.1 e utilizando o Proteus 8, foram consideradas suficientes para validar a funcionalidade deste estágio, foi utilizado o componente 74HC4066 como substituto do CI CD4066, devido à falta de blocos ideais para chaves analógicas no MultSim 14. Portanto, os resultados obtidos na simulação anterior foram considerados adequados para este estágio de condicionamento.

Já o estágio 3 de condicionamento, responsável pela amplificação primária do circuito, foi simulado utilizando o componente AD620, selecionado com base nos critérios estabelecidos anteriormente. Para atingir a amplificação desejada de aproximadamente 20 vezes, foi adicionado um resistor de 4.7K Ohm entre o pino 8 e o pino 1 do AD620. O componente foi alimentado por uma fonte simétrica de 5 V, e um sinal senoidal de 4 mVpp foi injetado em sua entrada não inversora. Esta amplitude é próxima àquela do sinal emitido pelo sensor de corda vibrante. Após passar pelo AD620, o sinal foi amplificado, alcançando uma amplitude máxima

de 93mV-Vpp, o que corresponde a uma amplificação de aproximadamente 23,25 vezes, valor próximo ao estipulado para este estágio de condicionamento.

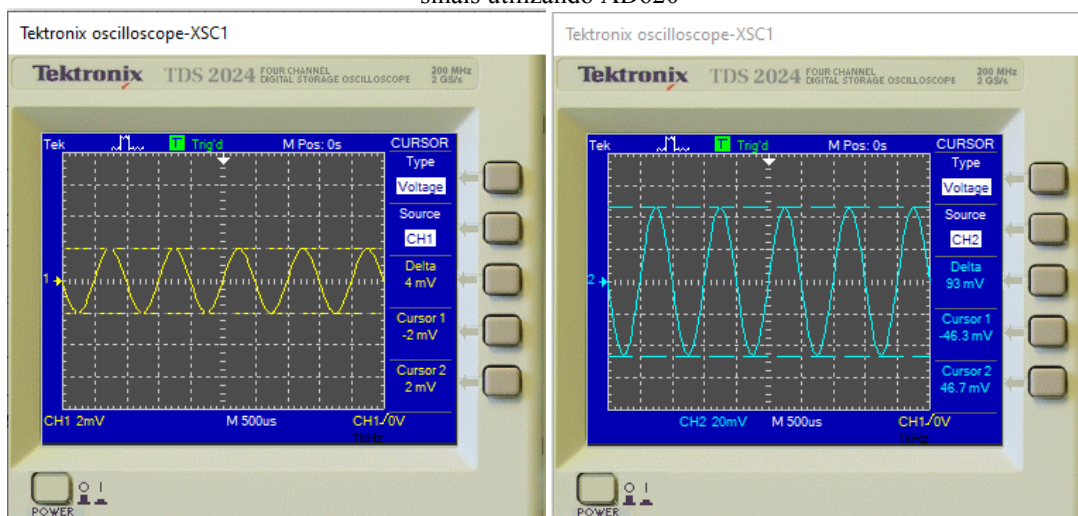
A Figura 61 apresenta a simulação do estágio 3 de condicionamento utilizando o AD620, enquanto os sinais de entrada e saída são detalhados na Figura 62.

Figura 61 – Simulação do estágio 3 de condicionamento utilizando o amplificador de instrumentação AD620



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 62 – Sinais de entrada e de saída, respectivamente, da simulação do estágio 3 de condicionamento de sinais utilizando AD620



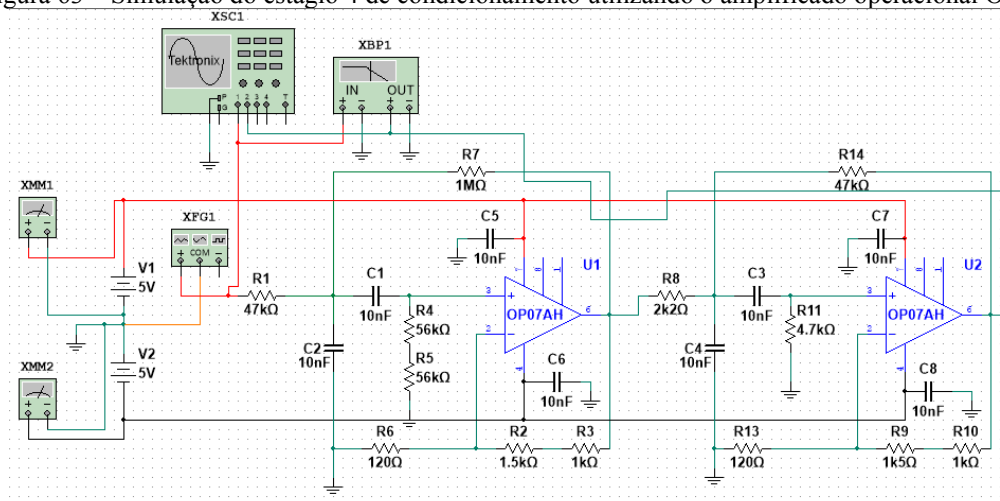
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Seguindo os procedimentos anteriores, foi realizada a simulação do estágio 4 de condicionamento, o filtro passa-faixa. Conforme citado anteriormente, além de filtrar o sinal, este estágio também tem a função de amplificar o sinal proveniente do estágio 3, amplificação primária. Para esta simulação foi utilizado o amplificador operacional OP07, que foi selecionado de acordo com o item 3.2.2.2.

O circuito do filtro simulado foi alimentado com uma tensão simétrica de 5 V. A Figura 63 apresenta a simulação do filtro realizada no MultSim 14, enquanto a Figura 64 mostra os

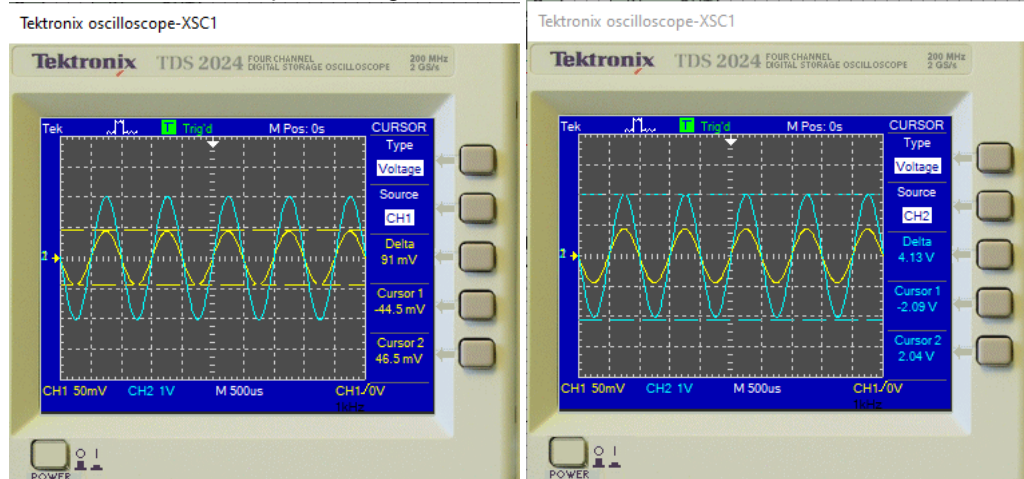
sinais de entrada e saída do filtro durante a simulação. O sinal de entrada possui uma amplitude aproximada de 91 mVpp, e o sinal de saída apresenta uma amplitude de 4,13 Vpp. Isto caracteriza um ganho de aproximadamente 45 vezes, o que está de acordo com os resultados esperados para este estágio de condicionamento.

Figura 63 – Simulação do estágio 4 de condicionamento utilizando o amplificado operacional OP07



Fonte: Elaborado pelo Autor.

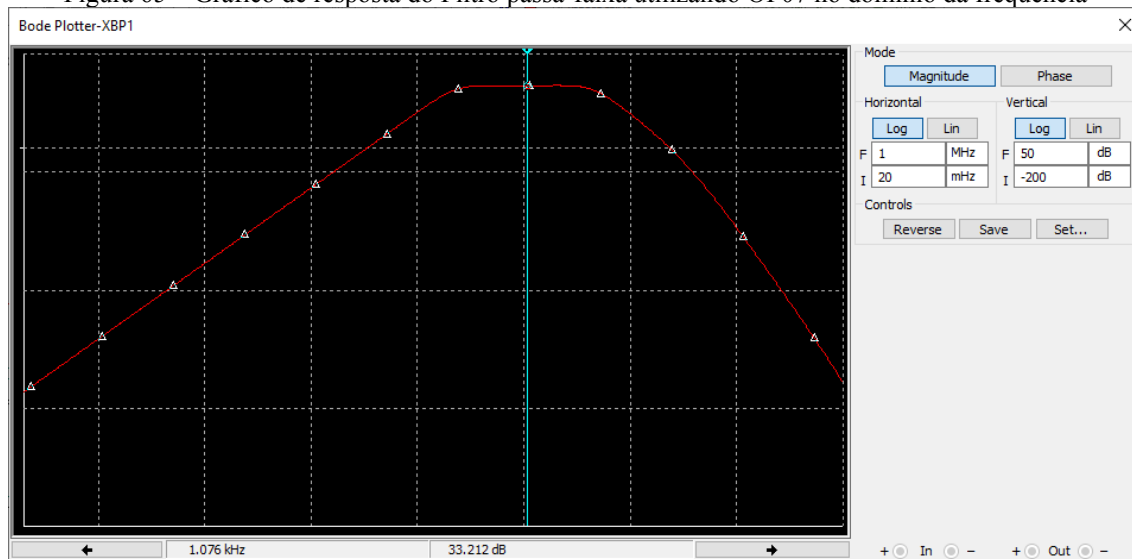
Figura 64 – Resultado da simulação do estágio 4 de condicionamento utilizando o amplificado operacional OP07



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Além disso, a seguir, na Figura 65 é apresentada a resposta em frequência do filtro simulado. Pode-se observar que o filtro possui uma resposta bastante semelhante à simulação realizada no item 3.2.2.1 utilizando componentes ideais. O gráfico revela respostas planas e um ganho adequado no centro da faixa de frequências.

Figura 65 – Gráfico de resposta do Filtro passa-faixa utilizando OP07 no domínio da frequência

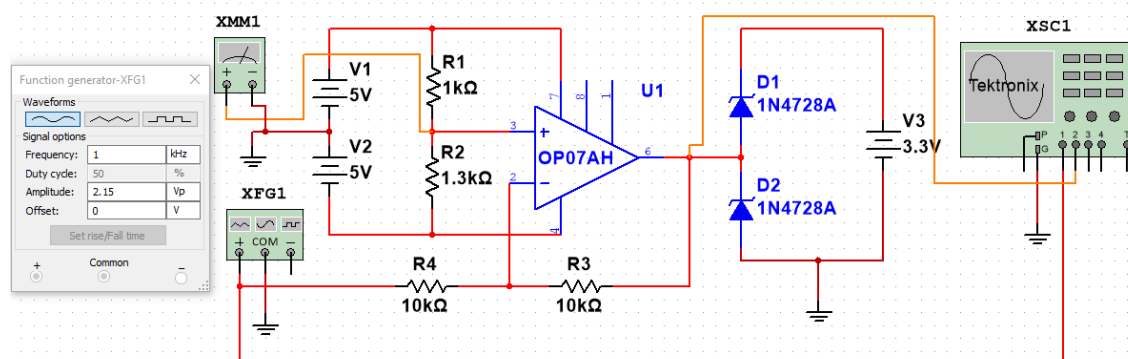


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para as simulações do estágio 5 de condicionamento, que envolve a amplificação final e o ajuste do sinal, utilizou-se o amplificador operacional OP07. Neste estágio, a função é fornecer um deslocamento de aproximadamente 1,65Vcc no sinal proveniente do estágio 4. No entanto, nas simulações realizadas no item 3.2.2.1 verificou-se que o sinal gerado nestas condições alcançava uma amplitude máxima superior a 4 Vpp, o que não é adequado para a leitura pelo microcontrolador ESP32.

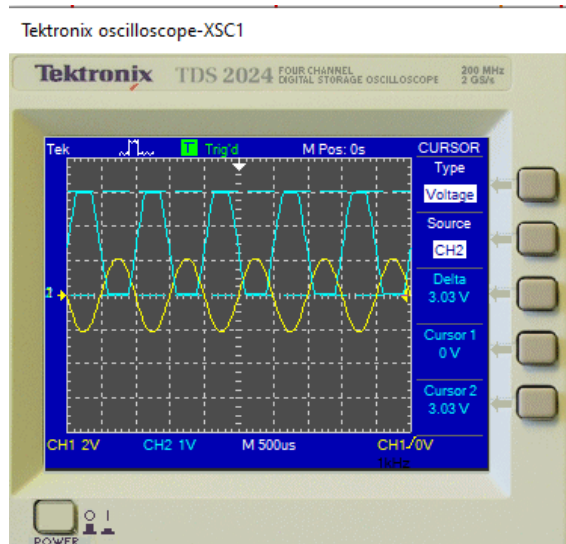
Diante desta questão foi projetado um circuito de proteção que incluiu dois diodos Zeners alimentados com 3,3 Vcc. Isto permitiu limitar a amplitude máxima do sinal de saída, adequando-o para a leitura pelo ESP32. A Figura 66 apresenta a simulação realizada para o estágio 5 com o circuito de proteção implementado. A Figura 67 exhibe o resultado da simulação, no qual é possível identificar o sinal com uma amplitude máxima de 3,03 Vpp, acompanhado de um deslocamento de aproximadamente 1,5 V devido ao divisor de tensão composto por R1 e R2.

Figura 66 – Simulação do estágio 5 de condicionamento de sinais utilizando o amplificador operacional OP07



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 67 – Resultado da simulação do estágio 5 de condicionamento utilizando o amplificador operacional OP07



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A simulação do estágio 6 de condicionamento não foi realizada nesta fase do projeto. No entanto, no item 3.2.2.1, a simulação para este estágio foi conduzida utilizando o software Proteus 8, com a utilização do CI 74HC40106, que é similar ao CI CD40106 escolhido para compor este estágio.

Nos testes realizados no item 3.2.2.1 para o CI 74HC40106 foi constatado que o componente se comportou conforme o esperado. No entanto, uma ressalva deve ser feita em relação à amplitude do sinal obtido na simulação. Neste caso, a amplitude foi transformada de uma onda senoidal para uma onda quadrada com amplitude de 5 Vpp e offset de 2,5 V. Estes parâmetros não estão de acordo com as especificações do ESP32, que será responsável por ler o sinal do sensor. Esta discrepância ocorreu devido ao módulo 74HC40106 não permitir a determinação da alimentação, que é um fator determinante para a amplitude do sinal de saída.

Assim, para validar o comportamento esperado deste dispositivo foi realizado o teste em bancada, validando o comportamento (este teste será apresentado no próximo item 3.2.24).

As simulações realizadas com os componentes comerciais selecionados demonstraram um bom desempenho e foram fundamentais para testar o comportamento dos componentes em suas funções específicas em cada estágio. Estas simulações servirão como base para a montagem dos estágios em bancada, a fim de realizar os testes de validação necessários. Através destes testes será possível verificar se os componentes selecionados e os estágios de condicionamento atendem aos requisitos e especificações estabelecidos para o projeto.

Portanto, os resultados obtidos nas simulações fornecem um embasamento sólido para a continuidade do projeto, permitindo que se avance para a próxima etapa de implementação dos estágios e posterior validação dos resultados em bancada.

3.2.2.4 Teste em bancada dos estágios do circuito simulado

Após a realização das simulações no Simulador MultSim 14 foram conduzidos testes práticos em cada estágio para verificar o comportamento individual deles. No entanto, em alguns casos, para validar a funcionalidade de determinados estágios, foi necessário incluir outros estágios em conjunto no mesmo teste, porque a interação entre eles é fundamental para a validação. Estes testes foram realizados no Laboratório de Eletrônica do Colégio Técnico da UFMG – LITE/COLTEC.

Para os testes de validação foram utilizadas protoboards multipontos de prototipagem rápida e jumpers de fios de cobre flexíveis. Estes componentes de prototipagem permitem a validação rápida, eficaz e controlada de circuitos eletrônicos, possibilitando a medição de parâmetros importantes e oferecendo flexibilidade na montagem.

O objetivo é formular o circuito final da Placa de Condicionamento, que contenha as funcionalidades necessárias para excitar o sensor de corda vibrante com o sinal gerado pela "Placa Universal", condicionar o sinal elétrico emitido pelo sensor de corda vibrante após a excitação, permitindo que a "Placa Universal" leia este sinal, o processe e transmita estas leituras.

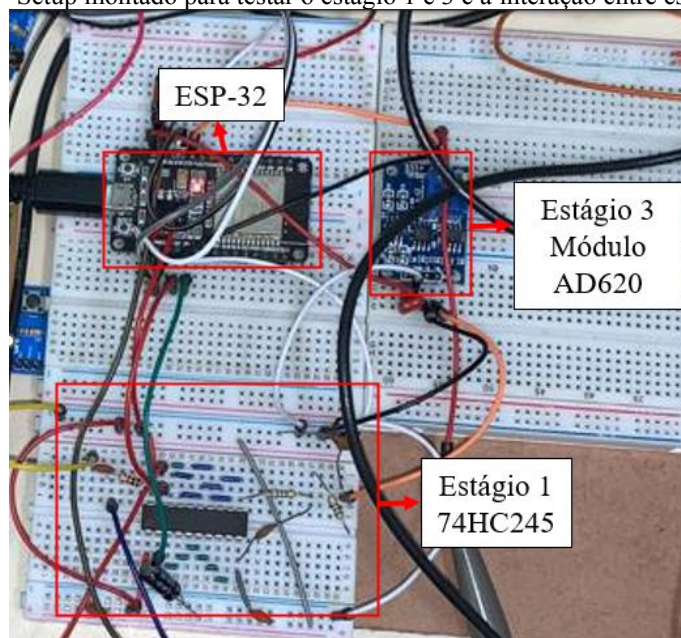
Com base nisto, vários testes foram executados, levando em consideração as informações necessárias a serem extraídas dos dispositivos elaborados, para garantir que eles funcionem e se comportem como projetados.

Inicialmente foram realizados testes com dois objetivos principais: comprovar o funcionamento do circuito de excitação e medir o sinal retornado pelo sensor de corda vibrante

usando um osciloscópio. Para isto foi elaborada a montagem em bancada ilustrada na Figura 68. Na protoboard multipontos foi conectado o 74HC245, ao qual foi acoplado o ESP32, que foi previamente programado para gerar o sinal de excitação, um pulso quadrado de frequência variável. E ainda foi configurado para controlar a direção e a liberação do sinal de excitação.

Em conjunto com o circuito de excitação foi montado um módulo AD620 com o objetivo de amplificar o sinal retornado pelo sensor e permitir sua visualização no osciloscópio. Em resumo, o módulo AD620 é composto por um amplificador de instrumentação e outros componentes que possibilitam o ajuste de ganho e offset do sinal por meio de potenciômetros multivoltas. Neste primeiro teste, os potenciômetros foram ajustados para um offset de 0 V e um ganho de aproximadamente 50 vezes.

Figura 68 – Setup montado para testar o estágio 1 e 3 e a interação entre esses circuitos



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com a montagem que a Figura 68 apresenta pronta, foi conectado um piezômetro de corda vibrante, modelo 4500C da Geokon, à saída do 74HC2045, juntamente com um AD620. O osciloscópio foi conectado à saída do AD620. A Figura 69 apresenta o sinal de excitação aplicado no sensor, destacado na seta da cor roxa e o sinal de resposta do sensor na seta da vermelha.

Observa-se que o sinal de excitação possui uma amplitude considerável quando comparada à amplitude do sinal devolvido pelo sensor de corda vibrante, mesmo depois de ser amplificado pelo módulo AD620. No programa desenvolvido para o ESP32 neste teste, além

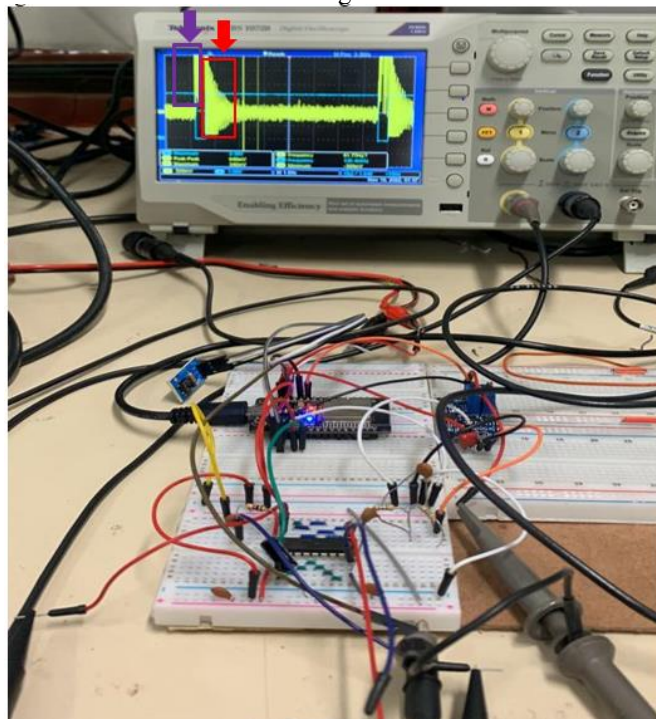
da geração do sinal de excitação, foram adicionados dois bits de controle para manipular o 74HC240.

Na Figura 69 destaca-se em vermelho o sinal de resposta do sensor, uma vez que o sinal de excitação é interrompido pelos bits de controle (controlado pelo ESP32), levando os pinos de saída do 74HC245 ao estado de alta impedância. Desta forma, foi possível registrar o sinal de resposta do sensor de corda vibrante. Por meio deste teste foi possível verificar a funcionalidade dos estágios 1 e 3.

No entanto, é importante ressaltar que foram identificados diversos ruídos neste teste, como evidenciado na Figura 69. Para atenuar esses ruídos foram adicionados filtros passa-faixa RC de primeira ordem, obtendo sucesso neste aspecto. Este fato reforça a necessidade de um filtro passa-faixa no circuito de condicionamento de sinais.

É importante destacar que durante os testes realizados nesta etapa foi possível identificar alguns problemas com o módulo AD620. Foram identificados problemas quanto a instabilidade do sinal amplificado e foram detectadas alterações nos ajustes do sinal amplificado, sem modificação física (sem alterar os potenciômetros multivoltas). Em outras palavras, ao ligar e desligar o módulo, em algumas ocasiões, os ajustes realizados nos potenciômetros não eram mantidos. Foram realizadas substituições dos módulos, o que muitas vezes solucionava o problema momentaneamente, porém, posteriormente, a instabilidade era identificada novamente. Portanto, este é um ponto crucial a ser considerado no projeto final da placa de condicionamento de sinais.

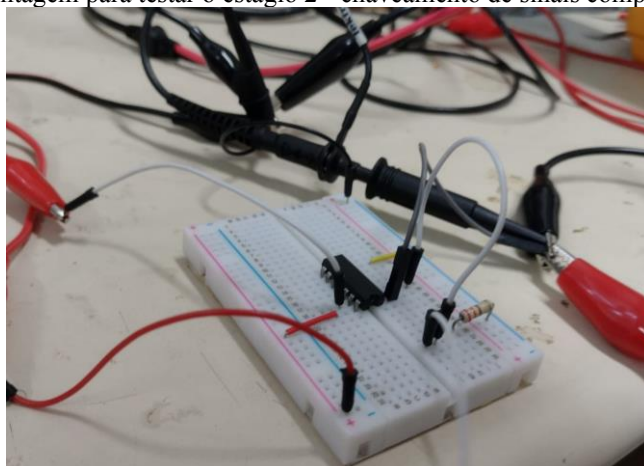
Figura 69 – Montagem e resultados dos testes do estágio 1 e 3 de condicionamento e a interação entre eles



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com base nos resultados dos testes dos estágios 1 e 3, foi configurado uma nova montagem para realizar o teste individual do estágio 2, que envolve o chaveamento dos sinais. O objetivo deste teste era verificar a capacidade da chave analógica CD4066 de realizar o chaveamento de sinais analógicos com eficiência e com o mínimo de ruído possível. Para isto foi elaborada a montagem (Figura 70), conforme ilustrado a seguir: o CI4066 foi conectado juntamente com jumpers de ligação, um resistor de “Pull Down” foi utilizado para garantir o nível lógico baixo no bit de controle da chave, e um gerador de sinais foi utilizado para gerar um sinal senoidal. Ao retirar ou colocar o jumper foi possível alterar o nível lógico e realizar o chaveamento deste sinal gerado.

Figura 70 – Montagem para testar o estágio 2 - chaveamento de sinais composto pelo AD620

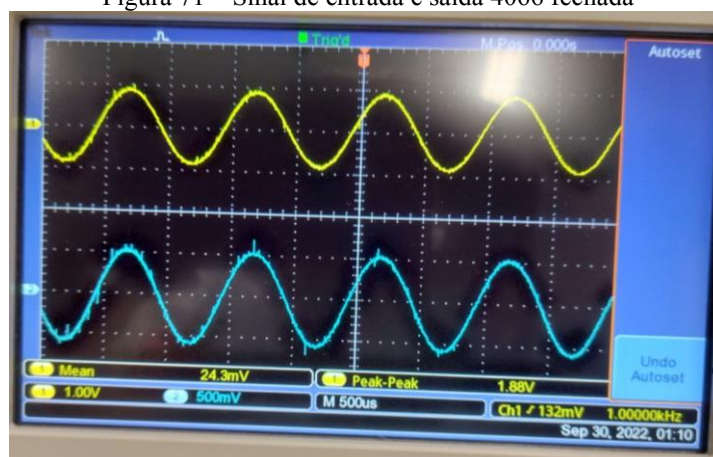


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Assim, as Figura 71 e Figura 72 apresentam o sinal de entrada (amarelo) e o sinal de saída (azul) após passarem pela chave analógica 4066, demonstrando o estado de chave fechada e a permissão do sinal, respectivamente. Por outro lado, a Figura 72 mostra o sinal de entrada em amarelo e o sinal azul cortado, indicando a abertura da chave.

É importante ressaltar que com a chave aberta foi identificado um pequeno ruído gerado. No entanto, este ruído não foi considerado preocupante, uma vez que apresenta baixa amplitude e pode ser originado por diversos fatores, como o uso de protoboard e jumpers de fio, entre outros. Além disto, este ruído não representa uma ameaça ao funcionamento do circuito de condicionamento.

Figura 71 – Sinal de entrada e saída 4066 fechada



Fonte: Elaborado pelo Autor.

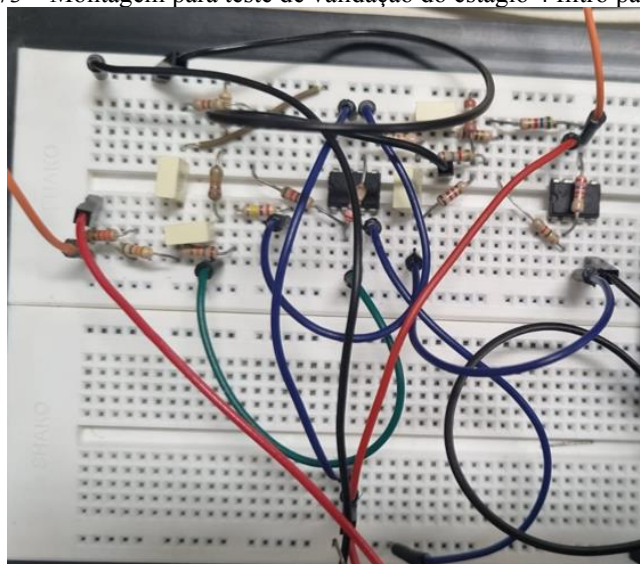
Figura 72 – Sinal de entrada e saída 4066 aberta



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após a validação do Estágio 2 de condicionamento de sinais foi montado um circuito de teste (apresentado na Figura 73) com o objetivo de testar o Estágio 4 - Filtro passa-faixa. Este estágio desempenha a função de filtrar o sinal, conforme os parâmetros previamente estabelecidos, e amplificar o sinal proveniente do Estágio 3 em aproximadamente 46 vezes. Para realizar o teste, um sinal senoidal com amplitude de aproximadamente 90 mVpp e offset de 0 V foi aplicado à entrada do filtro utilizando um gerador de sinais. Com base nas simulações realizadas, espera-se obter na saída do filtro um sinal de aproximadamente 4,15 Vpp, também com offset de 0 Volts.

Figura 73 – Montagem para teste de validação do estágio 4 filtro passa-faixa



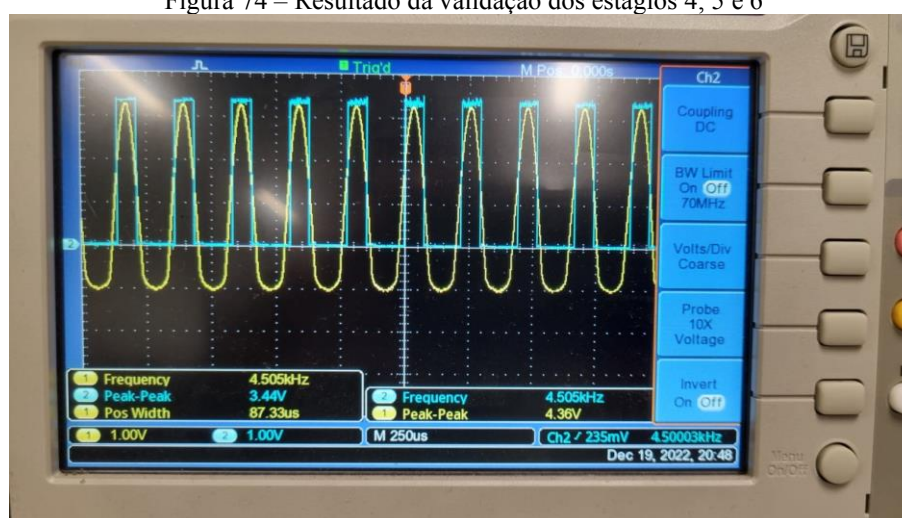
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Logo após a montagem para testar o Estágio 4, foi elaborado montado um novo circuito para testar o Estágio 5, que consiste na amplificação final e condicionamento do sinal. Este

estágio tem a função de aplicar um offset ao sinal fornecido pelo filtro passa-faixa, estabelecendo um offset de aproximadamente 1,65 V, conforme explicado anteriormente. Além disto, com o objetivo de agilizar os testes dos estágios subsequentes, foi adicionado o Estágio 6, composto pelo gatilho Schmitt. A Figura 74 apresenta os resultados destes testes.

Desta forma, o sinal mostrado em amarelo na Figura 74 representa o sinal com offset, filtrado e amplificado após passar pelos Estágios 4, 5 e 6. Já o sinal em azul representa a forma correta e a amplitude adequada após passar pelo gatilho Schmitt, alimentado com 3,3 V, para que possa ser lido pelo ESP32.

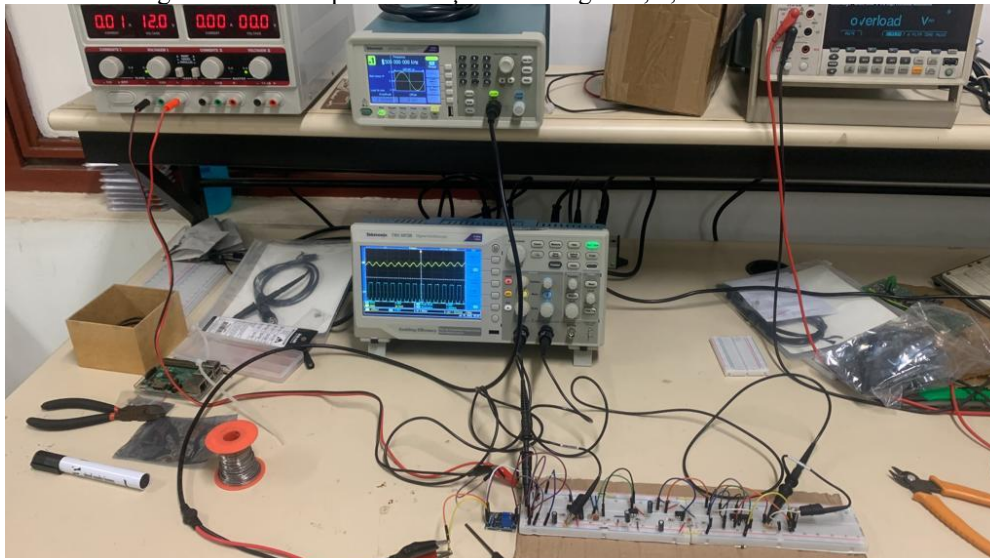
Figura 74 – Resultado da validação dos estágios 4, 5 e 6



Fonte: Elaborado pelo Autor.

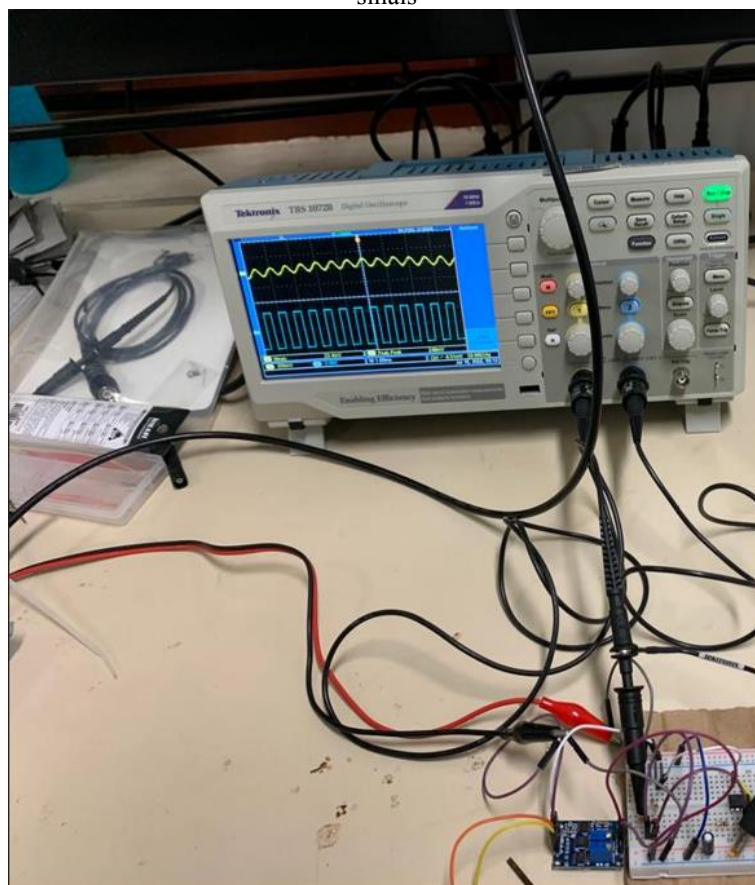
Por fim, a fim de validar todo o circuito de condicionamento de sinais, excluindo os estágios de excitação (1) e chaveamento (2) por já terem sido validados, foi montado o circuito ilustrado na Figura 75, composto pelos Estágio 3 (Amplificação primária), Estágio 4 (Filtro passa-faixa), Estágio 5 (Amplificação final e condicionamento) e Estágio 6 (Retificação do sinal). Utilizando o gerador de sinais foi aplicado um sinal senoidal com amplitude de 2 mVpp e offset de 0V (zero). O sinal em amarelo na Figura 76 representa este sinal de entrada, enquanto o sinal em azul representa o sinal condicionado, que atende a todos os requisitos para ser lido pela "Placa Universal".

Figura 75 – Montagem do circuito para validação dos estágios 3, 4, 5 e 6 de condicionamento de sinais



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 76 – Resultado do teste de validação em bancada dos estágios 3, 4, 5 e 6 da placa de condicionamento de sinais



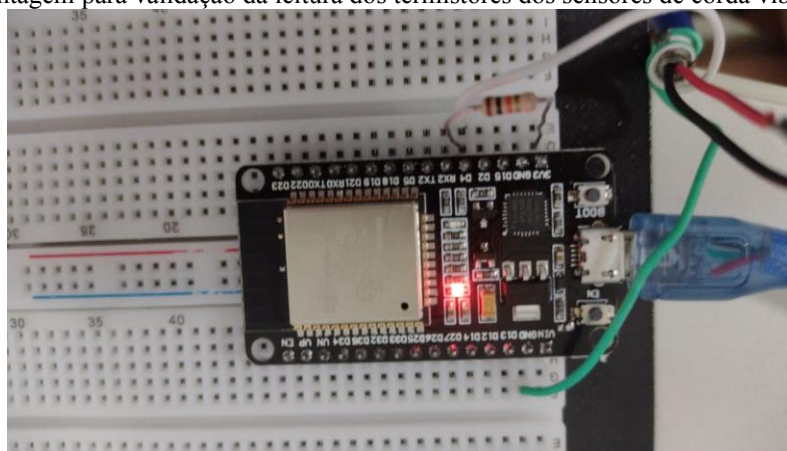
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após validar todos os estágios em bancada foram coletadas informações relevantes sobre tensão, comportamento inesperado e outras características, além de verificar a correta conexão conforme as simulações em software previamente realizadas.

Uma questão que ainda não foi abordada nas simulações em software, devido à simplicidade da solução, é o circuito para a leitura dos termistores dos sensores de corda vibrante. Conforme mencionado no Capítulo 2, todos os sensores modernos deste tipo possuem termistores incorporados em seu corpo, com o objetivo de medir as variações de temperatura que podem afetar diretamente a leitura dos sensores, conforme indicado nos manuais da Geokon, RTS, Slope Indicator e outros fabricantes.

Portanto, para validar a leitura dos termistores presentes nos sensores de corda vibrante foi elaborada a montagem apresentado na Figura 77. Esta montagem consiste em um ESP32, no qual o termistor de um piezômetro de corda vibrante, modelo 4500C da Geokon, está conectado ao GPIO4, juntamente com um resistor de 10k Ohm que compõe o divisor de tensão. Como o termistor é um resistor variável, ao criar um divisor de tensão com um resistor de resistência conhecida, é possível medir a variação de tensão resultante da variação de resistência do termistor. Deste modo, é possível ler a temperatura aplicando as constantes nas equações fornecidas na ficha de calibração do sensor.

Figura 77 – Montagem para validação da leitura dos termistores dos sensores de corda vibrante pelo ESP32

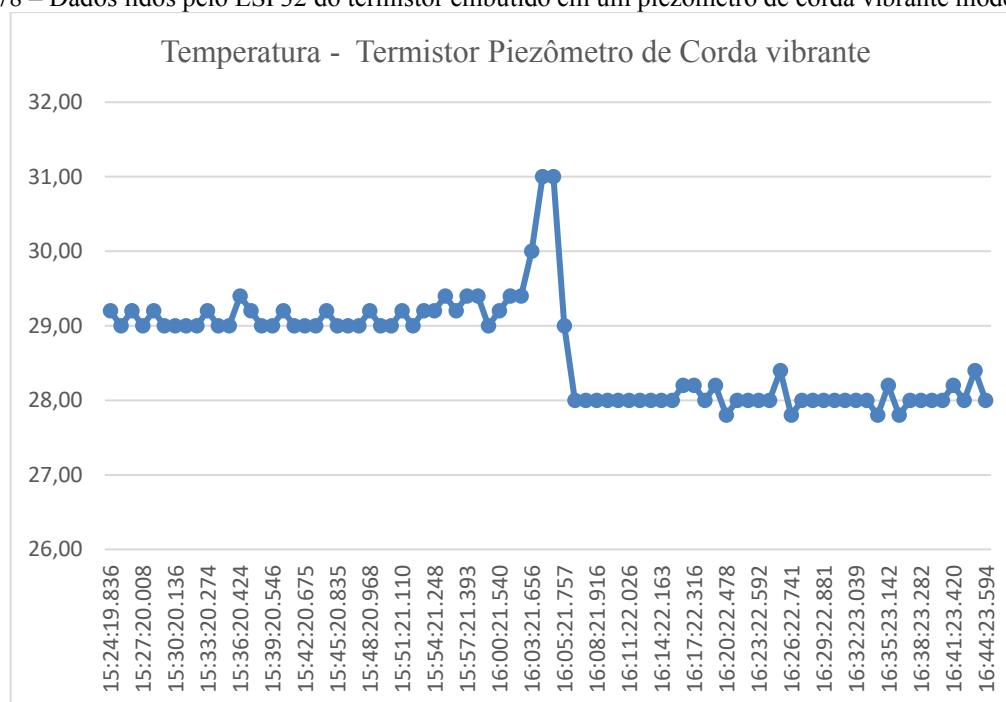


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após a montagem do circuito de teste foi desenvolvido um programa simples utilizando a IDE do Arduino, que foi carregado no ESP32 com o objetivo de realizar a leitura das variações de tensão do sensor. Além disto, as constantes necessárias para o cálculo da temperatura foram aplicadas, e o ESP32 foi programado para imprimir os dados de temperatura na porta Serial. A fim de validar as leituras e verificar a resposta do sensor às variações de temperatura foram realizadas várias leituras entre as 15h24 e as 16h44, com intervalos de 3 minutos. A partir das 15h27, o sensor foi imerso em água para verificar a variação efetiva de temperatura.

Observou-se que a partir das 15h57 o sensor apresentou uma variação brusca, atingindo 31°C. Esta variação ocorreu devido à manipulação do sensor durante a imersão na água. No horário das 16h03 foi observada uma queda acentuada na temperatura, e em seguida o sensor estabilizou em torno de 28°C. Esta temperatura é aproximadamente 1°C menor do que a temperatura ambiente fora da água. O gráfico exibido na Figura 78 apresenta os dados coletados durante os testes e ilustra o comportamento descrito anteriormente.

Figura 78 – Dados lidos pelo ESP32 do termistor embutido em um piezômetro de corda vibrante modelo 4500C



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após a conclusão dos testes de validação em bancada, surgem algumas considerações importantes em relação aos resultados obtidos:

- Observou-se a presença constante de ruídos nos sinais dos circuitos testados, destacando a importância de incorporar um filtro passa-faixa e de realizar um planejamento adequado do plano terra para a placa de circuito impresso, que será desenvolvida para o sistema de condicionamento de sinais;
- Observou-se instabilidade do sinal amplificado e dificuldade durante o ajuste do ganho e do offset utilizando os potenciômetros multivoltas do módulo amplificador de instrumentação AD620.

Todavia, apesar das considerações mencionadas, os testes de validação dos estágios de condicionamento de sinais ocorreram conforme o esperado, com os estágios e seus respectivos circuitos se comportando de acordo com as simulações realizadas anteriormente. Desta forma,

após todas as validações necessárias, o projeto da placa de condicionamento de sinais para leitura de sensores de corda vibrante foi desenvolvido, e será apresentado na seção a seguir.

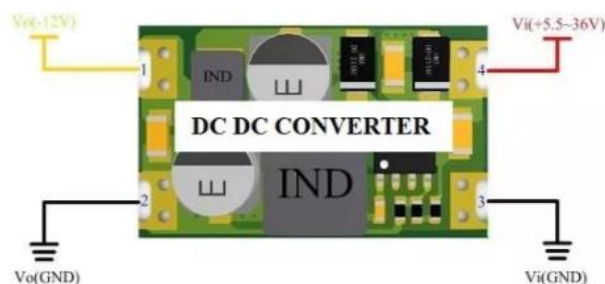
3.2.2.5 Projeto e elaboração da Placa de condicionamento de sinais

Para desenvolver o projeto da Placa de Condicionamento de Sinais utilizou-se o software EasyEDA, o mesmo empregado na elaboração do projeto da "Placa Universal". Inicialmente foi criado um diagrama esquemático no EasyEDA, unindo todas as etapas de condicionamento de sinais, e posteriormente o projeto da Placa de Condicionamento de Sinais foi gerado.

Entretanto, durante os testes de validação em bancada constatou-se a necessidade de uma tensão de alimentação simétrica na placa de condicionamento de sinais. Isto se deve aos amplificadores operacionais utilizados que requerem uma alimentação simétrica devido às suas funcionalidades no circuito de condicionamento, especialmente quando se lida com sinais de tensão alternada, como neste caso.

Diante desta exigência realizou-se uma pesquisa para identificar recursos que pudessem ser empregados na geração desta tensão negativa necessária. Durante a pesquisa verificou-se a disponibilidade, no banco de componentes do LITE (Laboratório de Informática, Telecomunicações e Eletrônica do COLTEC/UFGM), de um módulo conversor DC/DC capaz de gerar tensão negativa em seus terminais quando alimentado com uma tensão contínua positiva. A representação deste módulo conversor DC/DC é ilustrada na Figura 79.

Figura 79 – Representação do conversor DC/DC disponível no LITE

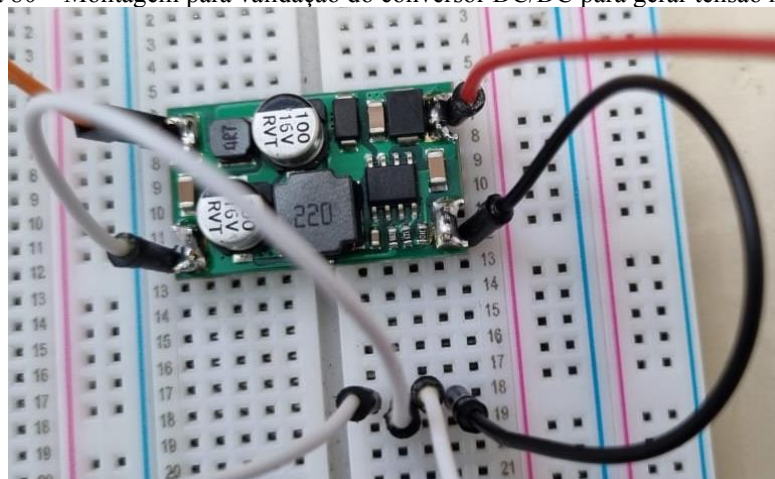


Fonte: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1003193461-conversor-dc-dc-tenso-negativa-12v-modulo-step-up-down-_JM

Com o propósito de validar o desempenho do conversor DC/DC disponível no LITE procedeu-se à montagem de um conjunto experimental, conforme ilustrado na Figura 80. O objetivo foi verificar o funcionamento adequado do conversor DC/DC e avaliar seus resultados.

Durante os testes realizados aplicou-se uma tensão de entrada de 12 Vcc e constatou-se que a tensão de saída foi de -5 Vcc, o que atende plenamente às exigências do projeto. Levando em consideração que a "Placa Universal" disponibiliza níveis de 12 Vcc, 5 Vcc e 3,3 Vcc, o módulo apresentou um desempenho conforme necessário para a aplicação na Placa de Condicionamento de Sinais.

Figura 80 – Montagem para validação do conversor DC/DC para gerar tensão negativa

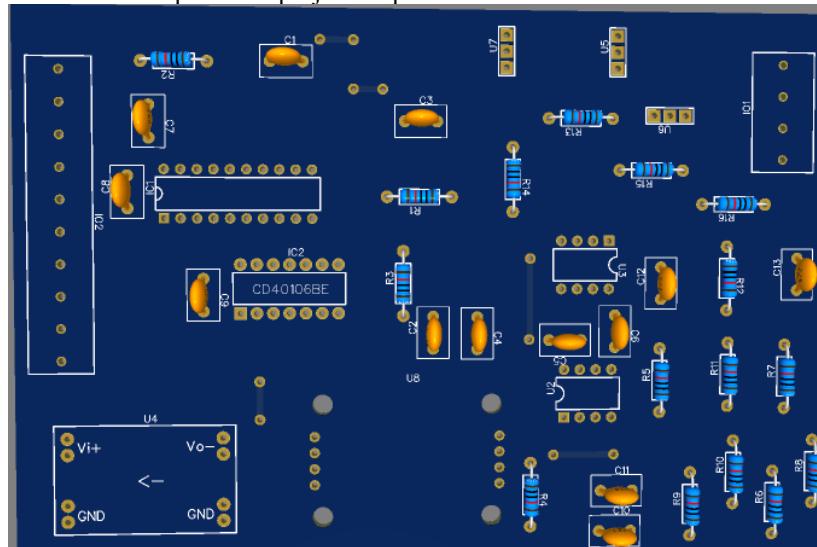


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com base na validação do funcionamento do conversor DC/DC, foi desenvolvido o projeto do primeiro protótipo da Placa de Condicionamento de Sinais. A Figura 81 apresenta o projeto deste protótipo inicial, que passou por algumas modificações visando principalmente à redução de custos. Neste contexto, considerando a capacidade de ajuste de offset presente no módulo AD620 decidiu-se remover o estágio 5 do circuito (Amplificação Final). A função de ajuste do offset adequado para a leitura pelo ESP32 foi atribuída ao próprio módulo AD620.

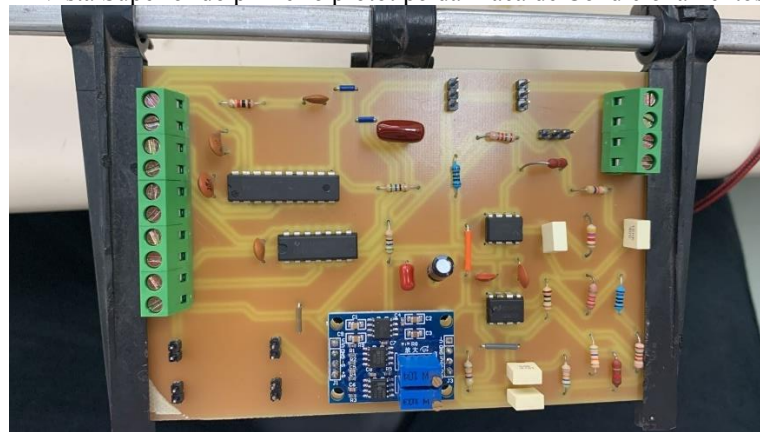
Desta maneira, o primeiro protótipo da Placa de Condicionamento de Sinais foi elaborado, conforme apresentado na Figura 81. A Figura 82 mostra a vista superior do protótipo inicial da "Placa Universal", enquanto a Figura 83 exhibe a vista inferior deste primeiro protótipo.

Figura 81 – Vista superior do projeto da primeira Placa de Condicionamento de Sinais



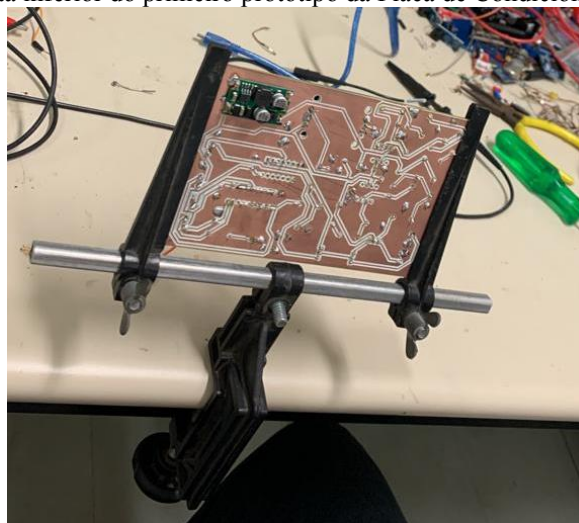
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 82 – Vista Superior do primeiro protótipo da Placa de Condicionamentos de Sinais



Fonte: Elaborado pelo Autor.

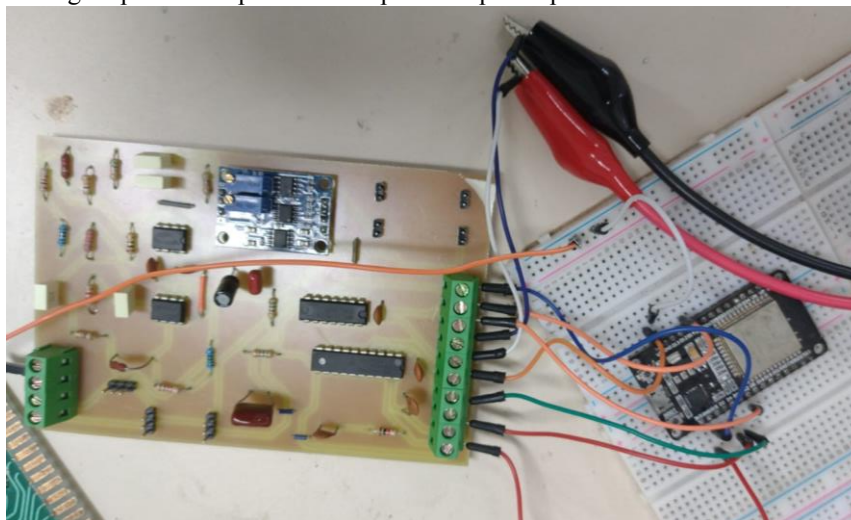
Figura 83 – Vista inferior do primeiro protótipo da Placa de Condicionamento de Sinais



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após a montagem do primeiro protótipo da Placa de Condicionamento de Sinais foram realizados testes preliminares para validar a solução proposta. Para isto foi elaborada a montagem mostrada na Figura 84, onde foram realizadas medições de tensão de alimentação em todos os componentes e testes para validar as funcionalidades do circuito.

Figura 84 – Montagem para testes primários no primeiro protótipo de Placa de Condicionamento de sinais



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No entanto, ao tentar reproduzir o teste anteriormente realizado para validar o funcionamento do protótipo, não foi possível identificar o sinal devolvido do sensor de corda vibrante após a excitação. Deste modo, diversas intervenções foram realizadas na tentativa de identificar os erros, revelando problemas como alimentação com polaridades invertidas e conexões incorretas em alguns pinos dos amplificadores operacionais do circuito, impossibilitando o funcionamento do protótipo.

Além disto, foram identificadas também instabilidades em estágios que puderam ser testados, por exemplo a instabilidade na regulagem de ganho e da regulagem de offset do módulo AD620, que foram identificadas nos primeiros testes, foi identificada novamente com a sua aplicação no primeiro protótipo da placa de condicionamento de sinais.

Diante das questões identificadas foi tomada a decisão de desenvolver uma nova interação da Placa de Condicionamento de Sinais (versão 2.0) com o objetivo de solucionar os problemas detectados na primeira versão. Para alcançar este fim foram tomadas as seguintes medidas:

- O estágio 5 (Amplificação Final) foi reintegrado ao circuito, abandonando a ideia original de controlar o Offset por meio do módulo AD620;
- O módulo AD620 foi substituído por um componente discreto;

- Houve um rearranjo dos componentes;
- Utilização de placa de circuito impresso com duas camadas de cobre.

Na nova versão da Placa de Condicionamento de Sinais, a escolha foi substituir o módulo AD620 por um componente discreto para a amplificação primária do sinal (Estágio 3), devido a problemas identificados nos testes iniciais de validação em bancada, conforme relatado na Seção 3.2.2.4.

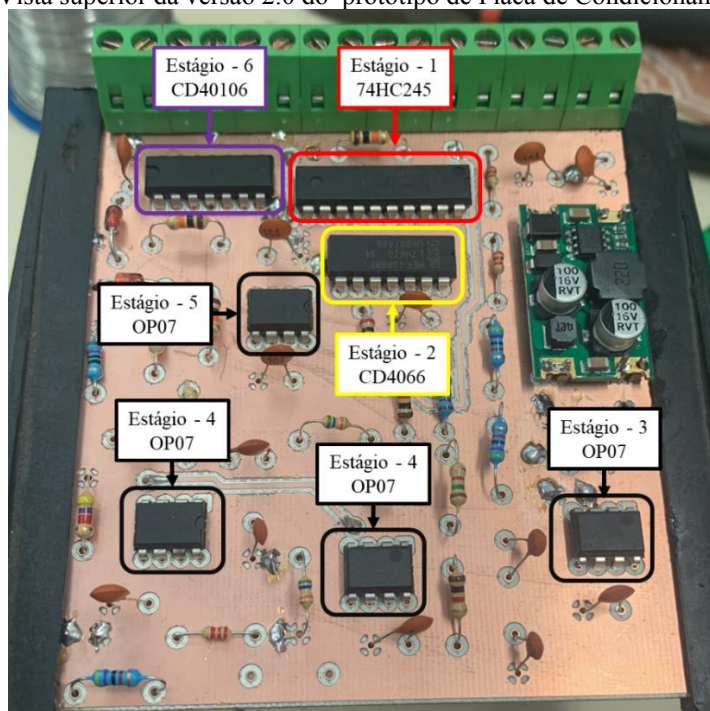
Para realizar esta substituição foi realizada uma pesquisa para identificar alternativas viáveis. Durante a pesquisa foi constatada a disponibilidade do amplificador operacional OP07 no banco de componentes do LITE. Este componente já havia sido validado para funcionar neste estágio, conforme descrito por Sang e Zhang (2020b).

Uma vantagem adicional desta escolha é que outros estágios da placa de condicionamento de sinais já fazem uso do OP07. Ao empregar o mesmo amplificador operacional em todos os estágios em que é necessário, torna-se mais viável a escalabilidade da solução, simplificando aquisições futuras e reduzindo os custos ao adquirir um mesmo componente em maior quantidade.

No que diz respeito à reintegração do estágio 5 (Amplificação Final), é importante ressaltar sua função de aplicar um deslocamento (offset) ao sinal de resposta do sensor após sua passagem pelo filtro passa-banda (Estágio 4). Esta etapa é necessária para adequar o sinal analógico, proveniente do sensor de fio vibrante, para que possa ser lido de maneira eficaz pelo ESP32. Para cumprir esta finalidade, optou-se por utilizar o amplificador operacional OP07, o qual foi validado para este estágio por meio das simulações detalhadas no item 3.2.2.3 desta dissertação.

Com base nestas considerações, o novo projeto da Placa de Condicionamento de Sinais foi desenvolvido, incorporando as modificações propostas. A nova versão do projeto é mostrada na Figura 85. Além disto, outras alterações foram implementadas, como o reposicionamento dos conectores e demais componentes, bem como a utilização de uma placa de circuito dupla face com cobre, em contraste com a versão anterior que era de face única. Estas modificações visam tornar a nova versão da placa mais compacta e organizada, reduzindo a probabilidade de erros e problemas de funcionamento.

Figura 86 – Vista superior da versão 2.0 do protótipo de Placa de Condicionamento de sinais



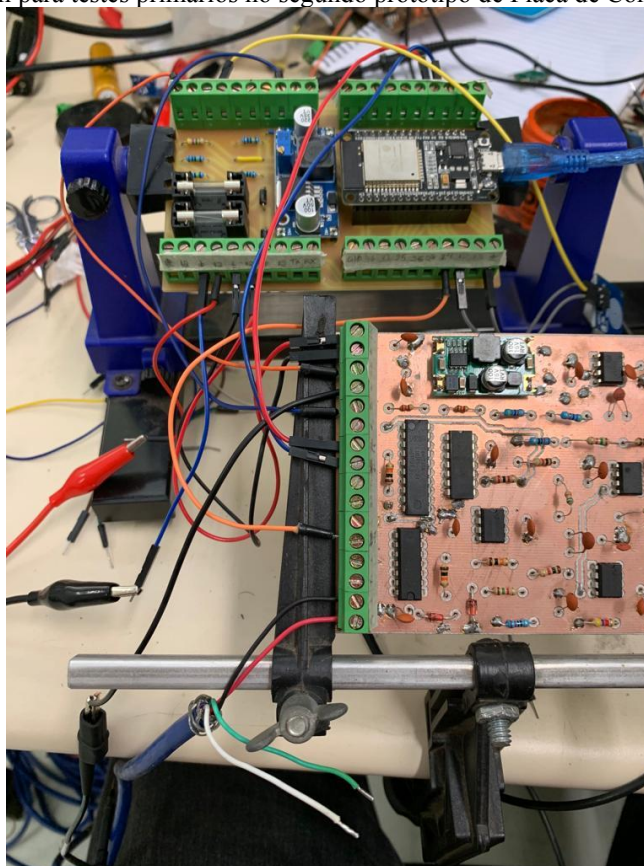
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para realização dos testes de funcionamento foi configurado um conjunto experimental, conforme ilustrado na Figura 87. Nesta montagem pode-se observar um protótipo da "Placa Universal" conectado à Placa de Condicionamento de Sinais, que por sua vez tem um piezômetro de corda vibrante, modelo 4500C da Geokon conectado. A conexão entre estes componentes pode ser visualizada na Figura 87, através dos fios preto e vermelho localizados nos conectores da extremidade inferior da placa.

Foram realizadas verificações de continuidade das conexões/trilhas utilizando um multímetro, foram realizadas medições das tensões de alimentação de todos os componentes, constatando assim a efetividade na montagem do circuito, com todas as medidas realizadas contendo os resultados esperados e modelados em projeto.

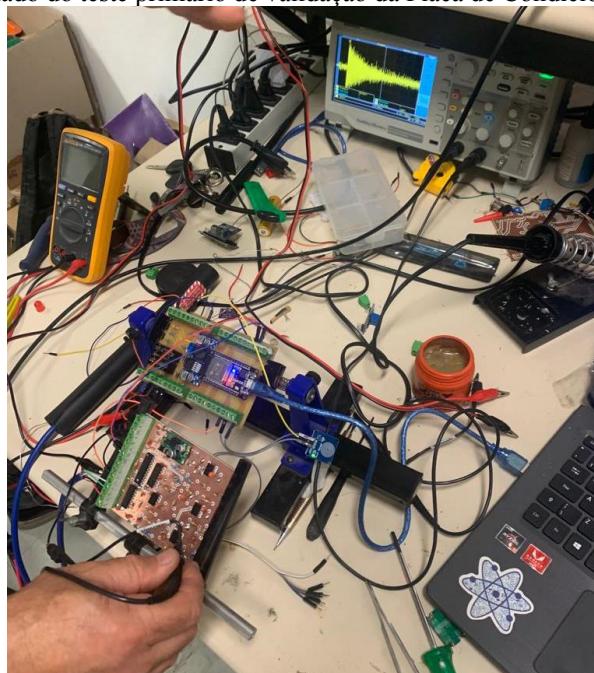
Assim, um algoritmo de teste foi carregado no ESP32 da "Placa Universal", gerando o pulso de excitação, com a expectativa de identificar o sinal de resposta do sensor de corda vibrante depois de passar pela Placa de Condicionamento de Sinais. O resultado deste teste pode ser observado na Figura 88, em que o sinal de resposta do sensor de corda vibrante é claramente visualizado no visor do osciloscópio, validando o teste e o funcionamento básico da Placa de Condicionamento de Sinais versão 2.0.

Figura 87 – Montagem para testes primários no segundo protótipo de Placa de Condicionamento de sinais



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 88 – Resultado do teste primário de validação da Placa de Condicionamento versão 2.0



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com base nos testes de validação primária realizados, foi possível confirmar o adequado funcionamento das funções básicas da segunda versão (versão 2.0) da Placa de

Condicionamento de Sinais. A partir destes resultados foi possível iniciar o desenvolvimento do Firmware da "Placa Universal", a qual deve incluir as lógicas necessárias para a leitura de instrumentos diversos, incluindo o sensor de corda vibrante, e ainda estabelecer a conexão com a internet e enviar os dados para o servidor MQTT, responsável pelo armazenamento e apresentação dos dados coletados.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE DA PLACA UNIVERSAL PARA LEITURA DO SENSOR DE CORDA VIBRANTE E TRANSMISSÃO AUTOMÁTICA DOS DADOS

3.3.1 Metodologia do desenvolvimento

O desenvolvimento do Firmware do Sistema de Aquisição de Dados Universal para Monitoramento de Barragens seguiu uma metodologia estruturada, que consistiu em um roteiro com etapas bem definidas. A seguir são apresentadas as etapas cumpridas para o desenvolvimento do Firmware da "Placa Universal".

1. Definição de Requisitos e Funcionalidades:

- Foi elaborada uma lista abrangente das funções necessárias para o programa do Firmware, garantindo a cobertura completa das funcionalidades requeridas pelo sistema de monitoramento de barragens.

2. Mapeamento de Hardware:

- Realizou-se um mapeamento detalhado do hardware disponível, identificando os componentes, interfaces e recursos necessários para a aquisição de dados e transmissão das leituras;
- Estas informações foram utilizadas como base para o desenvolvimento dos algoritmos, garantindo a compatibilidade adequada entre o software e o hardware.

3. Mapeamento e validação dos Recursos Disponíveis no LITE:

- Realizou-se o mapeamento dos recursos disponíveis no ambiente de desenvolvimento LITE, a fim de validar as funcionalidades implementadas.

4. Desenvolvimento dos Algoritmos:

- Com base nos requisitos e funcionalidades definidos, foram desenvolvidos os algoritmos necessários para a execução das funções requeridas pela Firmware;

- Todas as funções desenvolvidas foram testadas e verificadas, garantindo o correto funcionamento e assegurando a integridade dos dados adquiridos e transmitidos pelo sistema.

Portanto, o desenvolvimento do Firmware do sistema seguiu rigorosamente as etapas descritas acima, validando cada fase do processo. Estas etapas desempenham um papel fundamental para garantir o desenvolvimento adequado do Firmware, em conformidade com os requisitos e funcionalidades estabelecidos previamente. A seguir serão apresentadas detalhadamente as etapas de desenvolvimento.

3.3.2 Elaboração e desenvolvimento do Firmware do sistema

3.3.2.1 Etapa 1 - Definição de Requisitos e Funcionalidades

A primeira etapa da elaboração do Firmware consistiu em Definição de Requisitos e Funcionalidades. Então, foram definidos os requisitos funcionais e não funcionais, levando em consideração a finalidade do programa e as funções que ele deveria executar. A seguir são apresentados estes requisitos.

Requisitos Funcionais:

- Utilizar a IDE do Arduino para o desenvolvimento da firmware;
- Permitir a conexão do ESP32 com a internet utilizando o Wi-Fi embutido;
- Gerenciar e realizar a transmissão automática de dados via MQTT, garantindo uma conexão segura e eficiente;
- Utilizar o RTC (Real Time Clock) do ESP32 para a criação de contadores;
- Implementar reconexão automática com a internet e o servidor MQTT em caso de perda de conexão;
- Ser flexível e escalável para facilitar a adição de novas funções ou blocos de código para leitura de sensores com particularidades;
- Possibilitar a conexão via porta serial para utilização do "Módulo Teste de equalização em piezômetros do tipo standpipe";
- Incluir uma função para leitura dos sensores de corda vibrante, permitindo a interface com a placa de condicionamento de sinais e a emissão/leitura dos sinais.

Requisitos Não Funcionais:

- Utilizar uma interface de fácil utilização e conexão com o ESP32;
- Garantir a segurança e eficiência na conexão MQTT, utilizando recursos de segurança nativos do protocolo;
- Manter a estabilidade da conexão com a internet e o servidor MQTT, mesmo em situações de perda temporária de conexão;
- Possuir uma estrutura de código organizada e modular, facilitando a inserção de novas funcionalidades;
- Ser compatível com a placa de condicionamento de sinais e garantir a correta leitura dos sensores de corda vibrante.

3.3.2.2 Etapa 2 - Mapeamento de Hardware

Uma vez estipulados os requisitos necessários foi realizada uma revisão nos projetos das placas Universal e de Condicionamento de Sinais a fim de mapear o hardware destas placas, o qual é crucial para o correto desenvolvimento do firmware. A lista de I/O a seguir foi elaborada com base nestas informações, fornecendo dados importantes para o desenvolvimento do firmware. Além disto, nesta etapa também foram listados os recursos de hardware disponíveis nos conectores KRE da "Placa Universal".

A seguir estão listados os recursos disponíveis para os pinos do ESP32 que foram disponibilizados na "Placa Universal", juntamente com uma breve explicação de cada recurso:

- Input Only: indica que o pino é apenas de entrada e não suporta saída de dados;
- HSPI_Q: indica uma das linhas de dados (MOSI) do protocolo SPI de alta velocidade para transmissão de dados do dispositivo ESP32 para outros dispositivos;
- HSPI_CLK: indica a linha de clock (SCK) do protocolo SPI de alta velocidade para sincronização de dados na comunicação SPI;
- SensVP: indica um pino dedicado à medição de tensão do sensor (Voltage Sensing Pin);
- Xtal32P: indica um pino de entrada do oscilador externo de 32 kHz;
- Xtal32N: indica um pino de saída do oscilador externo de 32 kHz;

- DAC: indica a disponibilidade de um conversor digital-analógico para geração de sinais analógicos;
- MOSI: indica uma das linhas de dados (MOSI) do protocolo SPI para transmissão de dados do dispositivo ESP32 para outros dispositivos;
- SCL: indica a linha de clock (SCK) para sincronização de dados na comunicação I2C (Serial Clock Line);
- RTS: indica a linha de solicitação de envio (Request to Send) usada em comunicação serial assíncrona;
- CLK: indica uma linha de clock geral;
- SDA: indica a linha de dados (Serial Data Line) usada na comunicação I2C;
- MISO: indica a linha de dados (MISO) do protocolo SPI para recepção de dados de outros dispositivos;
- SCK: indica a linha de clock (SCK) do protocolo SPI para sincronização de dados;
- SS: indica a linha de seleção de escravo (Slave Select) usada no protocolo SPI para selecionar dispositivos escravos durante a comunicação.

Com os requisitos funcionais e não funcionais definidos e o mapeamento do hardware em mãos foi possível desenvolver o algoritmo que comporá o firmware do sistema de aquisição de dados universal para monitoramento de barragens, incluindo o teste de equalização em piezômetros utilizando IoT.

3.3.2.3 Etapa 3 - Mapeamento e Validação dos Recursos Disponíveis no LITE

Nesta etapa realizou-se o mapeamento dos recursos presentes no LITE que seriam necessários para a validação das funcionalidades do sistema desenvolvido. Verificaram-se os seguintes recursos importantes para os testes realizados: o mapeamento da rede de internet Wi-Fi disponível, uma vez que a Placa de Condicionamento de Sinais utilizará esta rede para comunicação com o servidor; a disponibilidade de um servidor MQTT para direcionamento das leituras; e a verificação da disponibilidade de um software gerenciador já em uso no LITE.

O Laboratório LITE-COLTEC, especializado no estudo e desenvolvimento de soluções utilizando IoT, oferece uma estrutura que dispõe de recursos facilitadores para a validação dos dispositivos. O laboratório possui um servidor com um IP público exclusivo, permitindo acesso remoto de qualquer local. E, em virtude de um projeto em andamento em parceria com a

Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA MG), o servidor do LITE foi configurado com um servidor MQTT através da instalação do Broker Mosquitto (Mosquitto, s.d.), bem como o Node-RED (Node-RED, s.d.) também foi instalado e configurado.

O Node-RED é uma plataforma de programação visual baseada em fluxos, que permite a criação de aplicações IoT de forma intuitiva e simplificada. Ele oferece uma interface gráfica que permite ao usuário conectar e configurar os dispositivos IoT, além de automatizar tarefas e integrar diferentes sistemas. Com o Node-RED é possível criar fluxos de dados entre os dispositivos conectados, processar informações, tomar decisões e controlar ações com base em eventos.

É importante ressaltar que estes recursos estavam disponíveis no LITE devido ao mencionado projeto em andamento. Com a prévia autorização do professor orientador deste trabalho, os recursos descritos a seguir serão utilizados e considerados no desenvolvimento do firmware do sistema.

3.3.2.4 Etapa 4 – Desenvolvimento dos algoritmos

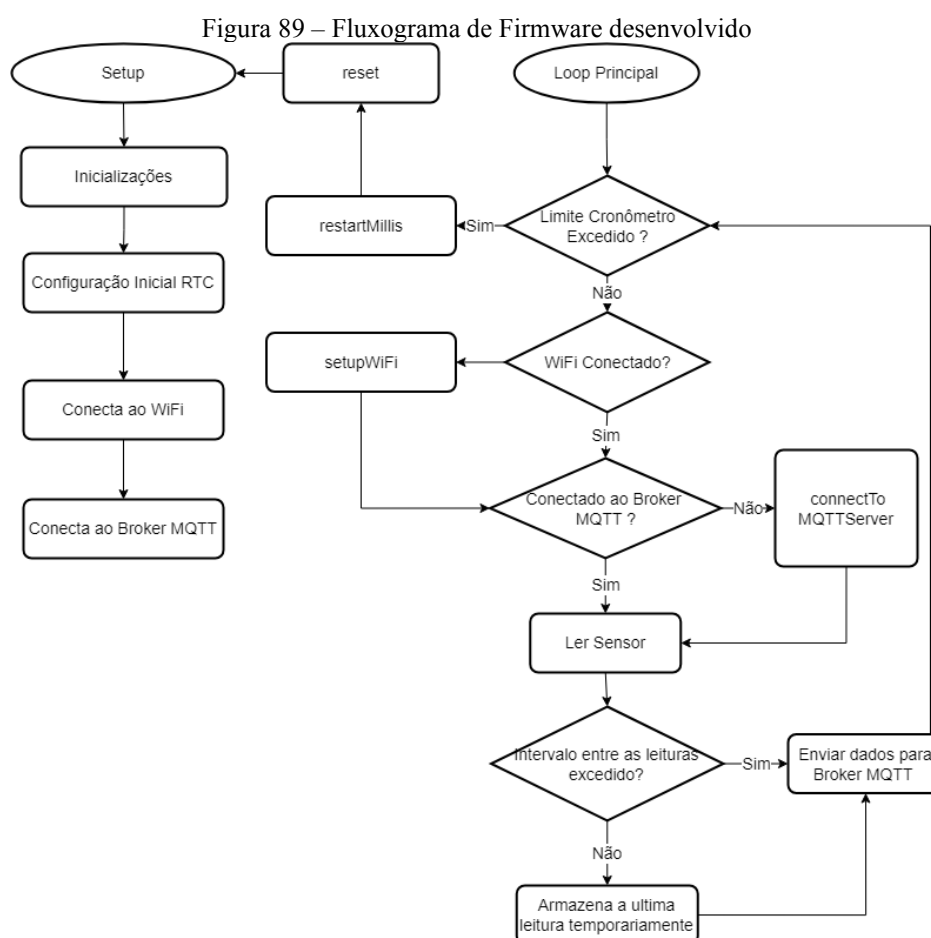
Para atender a todos os requisitos funcionais e não funcionais, o código foi integralmente desenvolvido no Arduino IDE. A escolha deste IDE para a elaboração do firmware do ESP32 foi motivada por sua interface amigável, recursos abrangentes e a existência de uma vasta comunidade de usuários. O Arduino IDE suporta a linguagem C/C++ e proporciona uma maneira intuitiva de escrever, compilar e fazer o upload do código, simplificando o processo de desenvolvimento, e a plataforma oferece uma ampla biblioteca de funções e exemplos, o que facilita o desenvolvimento de projetos.

Assim, utilizando o IDE mencionado foram desenvolvidas as seguintes funções:

1. Funções desenvolvidas para o Setup (funções executadas apenas quando o dispositivo é iniciado ou resetado):
 - `setupRTC`;
 - `setupWiFi` .
2. Funções desenvolvidas para o Loop (funções executadas durante a execução do programa):
 - `restartMillis`;
 - `reset`;
 - `connectToMQTTServer`;

- sendToMQTT;
- readSensorVW.

É importante ressaltar que os alunos do Colégio Técnico (COLTEC) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), que realizaram estágio no LITE durante o desenvolvimento da pesquisa, desempenharam um papel fundamental na concepção, desenvolvimento e testes das funções mencionadas anteriormente. Assim, na Figura 89 é apresentado o fluxograma feito para auxiliar no desenvolvimento do Firmware.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A função "setupRTC" é responsável por configurar o relógio de tempo real (RTC) no ESP32, permitindo a sincronização do tempo do sistema com servidores NTP. Esta função utiliza uma função de *callback* chamada "timeavailable" para notificar quando o tempo é atualizado, garantindo a acurácia do relógio interno do sistema. Esta sincronização precisa do tempo é essencial para o registro de leituras ao longo do tempo.

A função "setupWiFi" tem a finalidade de configurar e estabelecer a conexão Wi-Fi da "Placa Universal" com a rede especificada. Ela verifica o status da conexão atual e, caso não

esteja conectada, tenta estabelecer a conexão utilizando as credenciais fornecidas. Durante o processo de conexão, uma sequência de pontos é exibida no monitor serial para indicar o progresso da conexão. Ao finalizar, a função exibe a mensagem "CONECTADO!" se a conexão for estabelecida com sucesso, ou "NÃO CONECTADO" caso contrário. Esta função garante a conectividade da "Placa Universal" com a rede Wi-Fi, permitindo a comunicação com o servidor MQTT e o envio/recebimento de dados.

A função "restartMillis" foi desenvolvida com o propósito de reiniciar o ESP32 antes que o contador interno atinja o limite estabelecido. Ela verifica o valor atual do contador e, caso ultrapasse o limite, executa uma sequência de ações. Primeiro exibe a mensagem "Hora do reset cronômetro": junto com o valor atual do contador. Em seguida reinicia o contador para zero e chama a função "sendToMQTT" para realizar o último envio de dados para o servidor MQTT. Por fim, a função "reset" é acionada para reiniciar a "Placa Universal". Esta função é fundamental para controlar o tempo de operação da "Placa Universal", garantindo que ela seja reiniciada dentro do limite definido pelo contador interno do ESP32.

A função "reset" tem como objetivo reiniciar a "Placa Universal" de forma programática. Ao ser invocada, esta função imprime uma mensagem de reinicialização no log e executa a reinicialização da "Placa Universal". Ela é chamada pela função "restartMillis", permitindo que a "Placa Universal" seja reiniciada automaticamente após ultrapassar o limite de contagem máxima. O gerenciamento do estado do ESP32 é facilitado pela função "reset", possibilitando sua reinicialização de forma controlada e precisa, o que é útil em diversas aplicações e cenários de desenvolvimento.

A função "connectToMQTTServer" é responsável por estabelecer a conexão entre a "Placa Universal" e o servidor MQTT. Nesta função são configurados os certificados e chaves necessárias para autenticação e criptografia da comunicação. O cliente MQTT é configurado com as informações do servidor, como endereço IP e porta. A função verifica o estado da conexão atual e tenta estabelecer a conexão com o servidor MQTT, exibindo uma mensagem indicando se o dispositivo está conectado ou se ocorreu algum erro durante a conexão. Esta função desempenha um papel crucial ao estabelecer a conexão com o servidor MQTT, permitindo a troca de mensagens e o envio de dados entre o dispositivo e o servidor.

A função "sendToMQTT" tem a finalidade de enviar os dados coletados para o servidor MQTT. Ela verifica se o intervalo de tempo definido foi atingido desde o último envio ou se é o primeiro envio. Caso a condição seja verdadeira, os dados são formatados em mensagens MQTT e publicados nos respectivos tópicos. Após o envio, uma mensagem é exibida para indicar que os dados foram publicados com sucesso. Esta função desempenha um papel crucial

ao permitir a transmissão regular dos dados coletados pelo dispositivo para o servidor MQTT, facilitando a monitoração em tempo real e o armazenamento dos dados para análises futuras. E esta comunicação possibilita a atualização de gráficos e outras representações visuais dos dados em tempo real, oferecendo uma visualização atualizada das informações coletadas.

A função "readSensorVW" foi desenvolvida para realizar a leitura de um sensor elétrico de corda vibrante. Este sensor é estimulado por um trem de pulsos de frequência variável, visando se aproximar da frequência de vibração da corda. Quando ocorre a excitação, o sensor gera um sinal senoidal com decaimento exponencial. Esta função coleta o sinal emitido pelo sensor, armazena-o e realiza uma análise utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Por meio da análise dos dados obtidos pela FFT, é possível identificar o sinal com maior amplitude, o qual indica a componente de frequência de vibração da corda.

No início da função são definidos os valores iniciais para R0 e G, que são constantes utilizadas nos cálculos posteriores. Em seguida, o sinal de excitação é gerado por meio da função "tone" com frequências variáveis dentro de um determinado intervalo. Após a excitação, o sensor é desligado e configurado como entrada. Os valores de pico são resetados para serem atualizados a cada leitura.

Durante a coleta de amostras, os dados reais são armazenados e os dados imaginários são definidos como zero. O tempo de amostragem é controlado para garantir a periodicidade necessária. Em seguida é realizada a Transformada de Fourier, com remoção do componente de corrente contínua e cálculo da magnitude do sinal.

Após a transformada é feita a análise dos dados resultantes. O índice e a amplitude do sinal com maior pico são determinados, a partir dos quais é possível obter a frequência de pico. Esta frequência é utilizada em cálculos para determinar a pressão associada à vibração da corda.

O valor da pressão é impresso no monitor serial e há um atraso de 3 segundos antes de realizar uma nova leitura. A função "readSensorVW" desempenha um papel crucial ao coletar e analisar os dados do sensor, permitindo a obtenção da frequência de vibração da corda e fornecendo informações relevantes para aplicações que dependem desta medição.

Com a conclusão do desenvolvimento de todas as funções descritas anteriormente, os códigos foram carregados na "Placa Universal" e foram realizados testes de funcionalidades. Foi possível ler o sensor de corda vibrante e transmitir os dados para o servidor MQTT no laboratório, onde foram apresentados em formato de gráficos utilizando o software Node-Red, conforme detalhado no próximo item.

Além disto, o funcionamento do módulo de teste de equalização em piezômetros do tipo *standpipe* foi validado. Para esta etapa foi realizado um teste simples de comunicação da "Placa

Universal" com o Firmware desenvolvido e o software criado para o módulo mencionado. O teste foi efetivo, validando a possibilidade de conexão. Testes detalhados entre a "Placa Universal", Placa de Condicionamento de Sinais e módulo de teste de equalização desenvolvido são apresentados no Capítulo 5, item 5.5.

3.4 CONFIGURAÇÃO DO SERVIDOR E DO SISTEMA DE GESTÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS UNIVERSAL PARA MONITORAMENTO DE BARRAGENS

Conforme mencionado anteriormente, um dos recursos disponíveis no LITE e que foi utilizado no desenvolvimento desta pesquisa foi o servidor com IP público, o Broker Mosquitto e o software Node-RED, os quais já estavam instalados e funcionando no servidor presente no LITE-COLTEC.

O Mosquitto é um broker MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) de código aberto e popular que implementa o protocolo MQTT. Ele foi desenvolvido para ser leve, eficiente e adequado para uso em redes com recursos limitados, como dispositivos IoT.

O broker é um intermediário responsável por receber, armazenar e encaminhar mensagens entre diferentes nós. O broker é usado principalmente em conjunto com o protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) para facilitar a comunicação entre dispositivos IoT (Internet das Coisas). O MQTT é um protocolo leve e eficiente em termos de largura de banda, projetado para comunicação assíncrona e bidirecional entre dispositivos conectados à rede.

O Mosquitto possui uma arquitetura cliente-servidor, na qual os dispositivos MQTT funcionam como clientes e se conectam ao broker Mosquitto para trocar mensagens por meio de tópicos. O broker é responsável por receber, armazenar e encaminhar estas mensagens entre os clientes conectados.

Para interagir com o Mosquitto usando o Node-RED existem alguns nós MQTT disponíveis na paleta de ferramentas do Node-RED. Estes nós permitem a conexão com um broker Mosquitto específico e a realização da publicação e assinaturas de mensagens em tópicos MQTT.

Os nós MQTT no Node-RED possuem diversas configurações, incluindo o endereço do broker, as credenciais de autenticação, a configuração de segurança (como TLS/SSL) e os tópicos específicos, nos quais o nó irá publicar ou se inscrever. Na Figura 90 a seguir é mostrada a tela de configuração do Node-RED, onde o endereço do Broker que será utilizado é

configurado. Na tela também são determinados se serão utilizadas configurações TLS para a comunicação, qual protocolo será utilizado e o ID do cliente também é configurado.

Figura 90 – Tela de Configuração do NodeRed para apontar o Servidor MQTT que receberá os dados

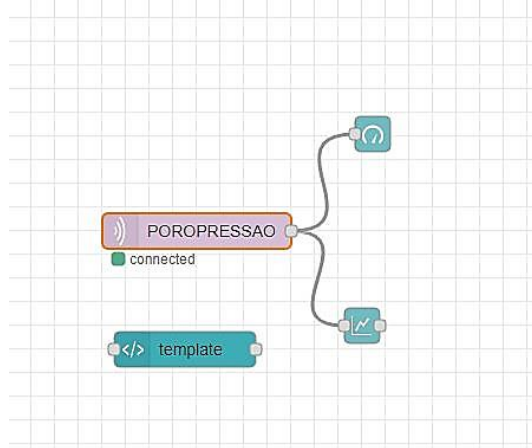
Fonte: Node-RED

Existem diferentes métodos de conexão disponíveis no Node-RED, que são os seguintes:

1. Ligação direta (conexão com fio): os nós podem ser conectados visualmente através de fios diretamente no editor do Node-RED. Esta conexão direta estabelece um fluxo de dados entre os nós conectados;
2. Conexões baseadas em eventos: além das conexões com fios, os nós também podem se comunicar usando eventos. Neste caso, os nós podem emitir eventos específicos e outros nós podem se inscrever nestes eventos para receber notificações.

Na Figura 91 a seguir é apresentado o nó criado para o teste de validação da comunicação entre os dispositivos desenvolvidos e o sistema de gestão e processamento de dados. Esta figura mostra o nó MQTT chamado "Poropressão" que está conectado a outros dois elementos na tela: um indicador gráfico configurado como "Gauge", que exibe o valor instantâneo das leituras, e um gráfico para exibir as leituras e suas variações ao longo do tempo. As configurações destes nós serão apresentadas posteriormente.

Figura 91 – Representação gráfica do nó criado no software Node-Red para receber os dados via MQTT

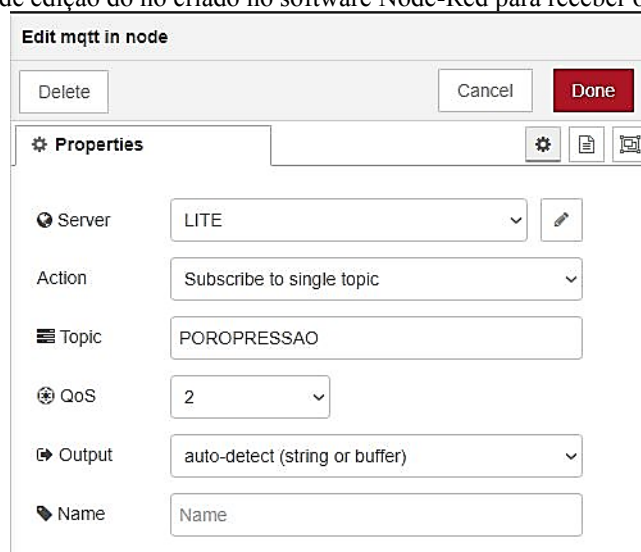


Fonte: Node-RED

A Figura 92 apresenta a tela de edição do nó MQTT criado no Node-RED. Nesta tela são encontrados os seguintes campos:

1. Campo "Server": permite inserir o endereço ou domínio do servidor MQTT utilizado;
2. Campo "Action": possibilita selecionar entre "subscribe" ou "publish" para receber ou enviar mensagens, respectivamente;
3. Campo "Topic": utilizado para especificar o tópico MQTT relevante para a comunicação. No caso deste estudo, o tópico foi definido como "Poropressão", representando a variável medida nos testes realizados;
4. Campo "QoS": permite definir o nível de garantia de entrega das mensagens;
5. Campo "Output": determina o formato de saída das mensagens processadas pelo nó;
6. Campo "Name": possibilita atribuir um nome personalizado ao nó MQTT, facilitando sua identificação no fluxo;
7. Esses campos são configuráveis e desempenham um papel fundamental na definição dos parâmetros de comunicação do nó MQTT no Node-RED.

Figura 92 – Tela de edição do nó criado no software Node-Red para receber os dados via MQTT



Fonte: Node-RED

As configurações de TLS (Transport Layer Security) no Node-RED dizem respeito à segurança no estabelecimento de conexões criptografadas para proteger a comunicação entre o Node-RED e outros dispositivos, serviços ou brokers MQTT.

O TLS é um protocolo criptográfico que oferece autenticação, privacidade e integridade dos dados transmitidos por meio de uma conexão segura. No contexto do Node-RED, as configurações de TLS são aplicadas principalmente ao utilizar os nós MQTT para se conectar a brokers MQTT que suportam conexões seguras.

Durante a configuração do TLS no Node-RED foram habilitadas as chaves e certificados necessários para aprimorar a segurança da transmissão automática dos dados lidos pelo sistema. Estes recursos de segurança estão incorporados ao protocolo MQTT e foram incluídos e programados no firmware desenvolvido para a "Placa Universal". Os certificados e chaves habilitados são listados e explicados a seguir:

1. Certificado de servidor (Server Certificate): é necessário fornecer um certificado de servidor válido para o broker MQTT ao qual se está conectando. Este certificado é usado para autenticar o servidor e estabelecer uma conexão segura;
2. Chave privada do servidor (Server Private Key): a chave privada correspondente ao certificado de servidor é necessária para estabelecer a conexão segura. A chave privada é usada para descriptografar os dados recebidos e criptografar os dados enviados;
3. Autoridade de certificação (Certificate Authority - CA): se o certificado de servidor foi emitido por uma autoridade de certificação (CA), é

necessário fornecer o certificado da CA para que o Node-RED possa verificar a autenticidade do certificado do servidor durante o processo de conexão.

A Figura 93 mostra a tela de configuração TLS, onde são inseridos os certificados que serão validados com base nos dados inseridos no firmware desenvolvido para a "Placa Universal", conforme detalhado na seção 3.3.

Figura 93 – Tela de configuração do TLS no software NodeRed

Edit mqtt in node > Edit mqtt-broker node > Edit tls-config node

Delete Cancel Update

Properties

Use key and certificates from local files

Certificate Upload server.crt

Private Key Upload server.key

Passphrase private key passphrase (optional)

CA Certificate Upload ca (2).cert

Verify server certificate

Server Name for use with SNI

ALPN Protocol for use with ALPN

Name Name

Fonte: Node-RED

Após a configuração do nó MQTT principal de conexão, denominado "Poropressão", foram realizadas as configurações dos nós responsáveis pela apresentação dos dados recebidos, os quais são conectados ao mencionado nó principal.

Desta forma, na Figura 94 a seguir é exibida a tela de configuração da aparência do Indicador Gráfico (Gauge). Nesta tela foram definidos diversos parâmetros, tais como o grupo de dados a ser apresentado no elemento, o tamanho do elemento na tela, a cor dos componentes, entre outros. Estas configurações têm como objetivo personalizar a aparência e o comportamento do Indicador Gráfico para melhor visualização e compreensão dos dados.

Figura 94 – Tela de Configuração da aparência do indicador gráfico do software NodeRed que vai apresentar os dados recebidos via MQTT

Properties

Group: [SADUMBA] POROPRESSAO

Size: 11 x 6

Type: Donut

Label:

Value format: {{value}}

Units: mca

Range: min 0 max 2.5

Colour gradient: [Red] [Yellow] [Green]

Sectors: 0 ... optional ... optional ... 2.5

Class: sadumba-gauge

Name:

Fonte: Node-RED

Assim como foi feito para o Indicador Gráfico mencionado anteriormente, também foram realizadas configurações de aparência para o gráfico que exibirá as leituras feitas pelos dispositivos do sistema e transmitidas para o Broker MQTT.

Na Figura 95 a seguir é exibida a tela de configuração do gráfico responsável por apresentar as leituras. Nesta tela são definidos diversos parâmetros relacionados à aparência do gráfico, como estilo, cores, tipo de visualização, entre outros. Estas configurações visam proporcionar uma representação visual adequada das leituras realizadas, permitindo uma compreensão mais clara e precisa dos dados coletados.

Figura 95 – Tela de Configuração da aparência do Gráfico do software NodeRed que vai apresentar os dados recebidos via MQTT

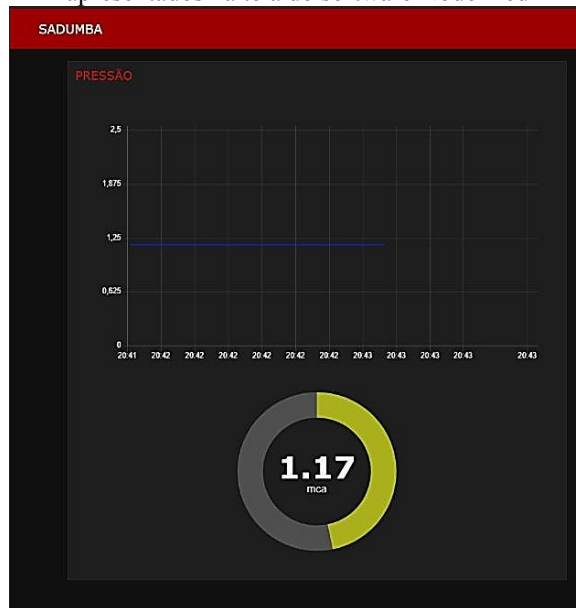
Fonte: Node-RED

Após a realização de todas as configurações mencionadas anteriormente, foi possível acessar a tela apresentada na Figura 96. Nesta tela pode-se observar o gráfico configurado, exibindo as leituras de poropressão ao longo do tempo, bem como o indicador gráfico criado, mostrando a última leitura registrada pelo sistema.

Para a geração dessas leituras e, conseqüentemente, a validação inicial da comunicação e das funcionalidades configuradas no sistema, foi utilizado um piezômetro do modelo 4500C da Geokon. Este piezômetro foi inserido em um tubo de PVC fixado em um gabarito desenvolvido para a realização de testes nos dispositivos desenvolvidos. Este gabarito será abordado em detalhes no Capítulo 5 da pesquisa.

No entanto, é importante ressaltar que o gabarito já estava disponível para uso no momento da conclusão da configuração do sistema de gestão e processamento. Além disto, a "Placa Universal" e a Placa de Condicionamento de Sinais também estavam prontas para uso. Desta forma, o sensor foi conectado aos dispositivos, uma carga de aproximadamente 1,13 mca foi aplicada ao gabarito e a leitura realizada pelo dispositivo foi transmitida ao broker MQTT, como mostrado na Figura 96. Esta validação confirmou a funcionalidade da solução implementada.

Figura 96 – Tela de apresentação das leituras do sensor de corda vibrante transmitidos via MQTT para o broker e apresentados na tela do software Node-Red



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4 DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO DE TESTE DE EQUALIZAÇÃO EM PIEZÔMETROS TIPO *STANDPIPE*

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O objetivo do presente desenvolvimento consiste em criar um módulo de teste de equalização para piezômetros do tipo *standpipe*, aproveitando os recursos disponíveis na "Placa Universal" e na Placa de Condicionamento de Sinais. Este módulo será criado utilizando a linguagem C# e .net, com o recurso WindowsForm. O módulo visa automatizar parcialmente o ensaio de equalização, um procedimento crucial mencionado no Capítulo 2, item 2.5, para verificar o funcionamento e o desempenho destes piezômetros ao longo do tempo.

O módulo desenvolvido é composto por um software que se comunica com a "Placa Universal" através de uma conexão serial. Esta abordagem se utiliza da escalabilidade e das capacidades de comunicação desta placa. A conexão serial é habilitada exclusivamente para permitir a comunicação física entre um computador com o software do módulo de teste de equalização instalado e o microcontrolador da "Placa Universal". Uma vez estabelecida esta comunicação, o operador deve seguir as instruções exibidas na interface do software e realizar os testes necessários.

Nos próximos subitens serão apresentadas a metodologia utilizada para o desenvolvimento do módulo, as funcionalidades do software, as telas da interface, as instruções detalhadas que o operador deve seguir e outras informações relevantes.

4.2 METODOLOGIA UTILIZADA PARA DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO DE TESTE DE PIEZÔMETROS

A metodologia adotada para o desenvolvimento do módulo de teste de piezômetros do tipo *standpipe* seguiu um processo estruturado, visando à criação de um aplicativo funcional e de fácil utilização. O principal objetivo deste módulo é automatizar parcialmente os testes de equalização realizados em piezômetros do tipo *standpipe*. Métricas iniciais foram estabelecidas para orientar o desenvolvimento e garantir que o módulo atendessem à sua finalidade.

- I. Definição dos requisitos:
 - Identificação dos recursos e funcionalidades necessários para o software;
 - Listagem dos requisitos funcionais e não funcionais.
- II. Projeto da estrutura do software:

- Criação de um esboço da interface do usuário;
 - Identificação dos formulários e controles necessários.
- III. Desenvolvimento da lógica do software:
- Criação de um projeto Windows Forms no ambiente de desenvolvimento Visual Studio;
 - Implementação dos formulários e controles para interação com o usuário;
 - Implementação da lógica dos eventos dos controles para responder às ações do usuário;
 - Implementação da lógica do software, incluindo manipulação de dados coletados e regras de execução.
- IV. Teste e depuração do software:
- Execução de testes funcionais para garantir o correto funcionamento de todas as funcionalidades;
 - Realização de testes de usabilidade para garantir a intuitividade da interface do usuário.

Seguindo estas etapas de desenvolvimento foi possível criar um aplicativo funcional, com uma interface amigável, que foi submetido a testes abrangentes para garantir sua qualidade e usabilidade. No item 4.3 será descrito detalhadamente o módulo criado, incluindo seus componentes, funções e funcionalidades implementadas.

4.3 DESCRIÇÃO DO MÓDULO DESENVOLVIDO E DOS SEUS ELEMENTOS

O módulo criado apresenta uma tela inicial, ilustrada na Figura 97. Esta tela possui 3 (três) campos: "Conectar Dispositivo", "Leituras Atuais" e "Módulo Teste Piezômetros". Cada campo será descrito a seguir, explicando a função de cada elemento.

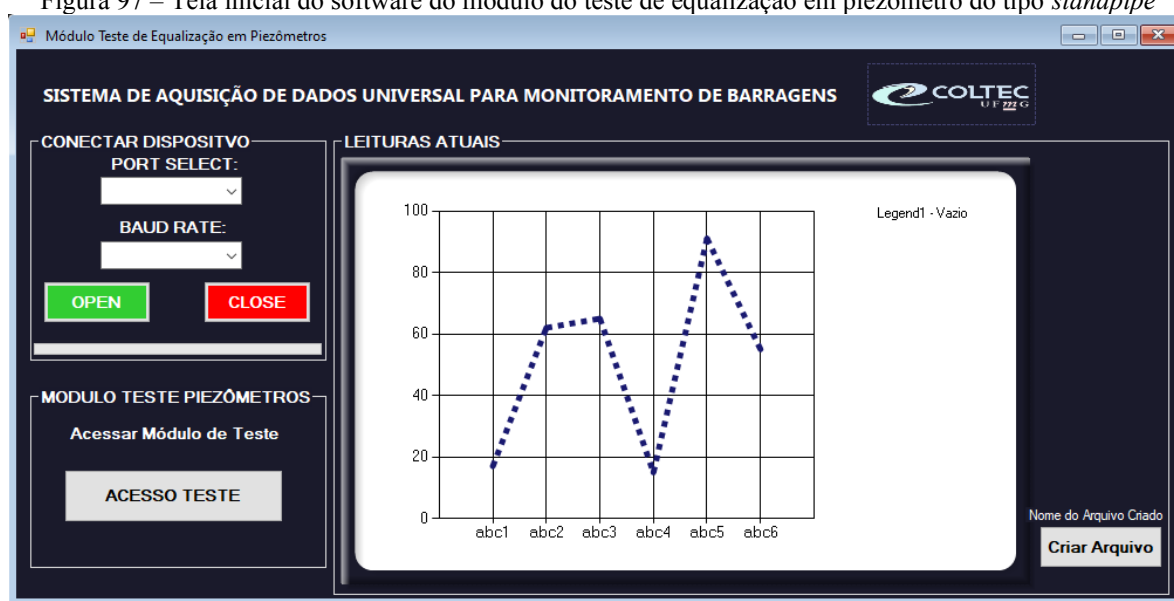
Conectar dispositivos: este campo contém duas caixas de seleção, nas quais o operador pode escolher a porta Serial à qual a "Placa Universal" está conectada, assim como a velocidade de conexão desejada para estabelecer a comunicação com a "Placa Universal". E este campo possui um botão "OPEN" que, quando pressionado, estabelece a conexão do software com a "Placa Universal". O botão "CLOSE" encerra a conexão com a "Placa Universal".

Leituras Atuais: após selecionar as opções no campo "Conectar Dispositivos", o software do módulo de teste de equalização envia um comando à "Placa Universal". Caso haja uma Placa de Condicionamento de Sinais conectada e um instrumento de corda vibrante esteja

sendo lido, as leituras serão exibidas no gráfico presente neste campo. No eixo X é mostrado o tempo, enquanto no eixo Y é apresentada a variação das leituras. Neste campo há um botão denominado "Criar Arquivo" que, ao ser pressionado, abre uma tela, permitindo ao usuário escolher o local onde o arquivo contendo as leituras do teste de equalização será armazenado.

Módulo Teste Piezômetros: este campo possui exclusivamente um botão "ACESSO TESTE". Ao ser pressionado ele permite o acesso à tela do módulo de teste de equalização. Nesta tela serão inseridos os dados de entrada do piezômetro que será ensaiado. A tela do teste é apresentada ao acionar o referido botão e é ilustrada na Figura 97.

Figura 97 – Tela inicial do software do módulo do teste de equalização em piezômetro do tipo *standpipe*



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Figura 98 apresenta a tela que é aberta ao acionar o botão "Acesso Teste". Esta tela, denominada "Teste de Equalização", possui dois campos principais: "Entrada de Dados" e "Instruções para Execução do Ensaio".

No campo "Entrada de Dados" são disponibilizados 12 (doze) campos para inserção dos seguintes dados:

- Nome do Instrumento;
- Diâmetro do tubo;
- Cota do Topo do Tubo;
- Cota de instalação;
- Altura do bulbo drenante;
- Carga inicial;

- Peso específico natural do solo;
- Densidade do solo saturado;
- Peso específico da água;
- Ângulo de atrito efetivo dos solos;
- Coeficiente de empuxo em repouso.

Além dos elementos de entrada de dados mencionados no campo anterior, foram incluídos dois botões: "Voltar" e "Calcular". O botão "Voltar" é configurado para apagar os dados inseridos tanto no campo de entrada de dados quanto nos dados calculados exibidos no campo "Instruções para Execução do Ensaio". Ao acionar este botão a tela atual é fechada e a primeira tela é apresentada novamente.

Ao pressionar o botão "Calcular", todas as variáveis necessárias para a realização do ensaio de equalização são calculadas. É importante ressaltar que todas as equações utilizadas para estes cálculos, tanto para determinar o volume de água a ser inserido no piezômetro sem causar ruptura hidráulica, quanto para calcular a permeabilidade resultante do ensaio, foram rigorosamente seguidas, conforme apresentado e descrito no Capítulo 2, item 2.5 desta dissertação.

Figura 98 – Tela do módulo de teste de equalização em piezômetro

Fonte: Elaborado pelo Autor.

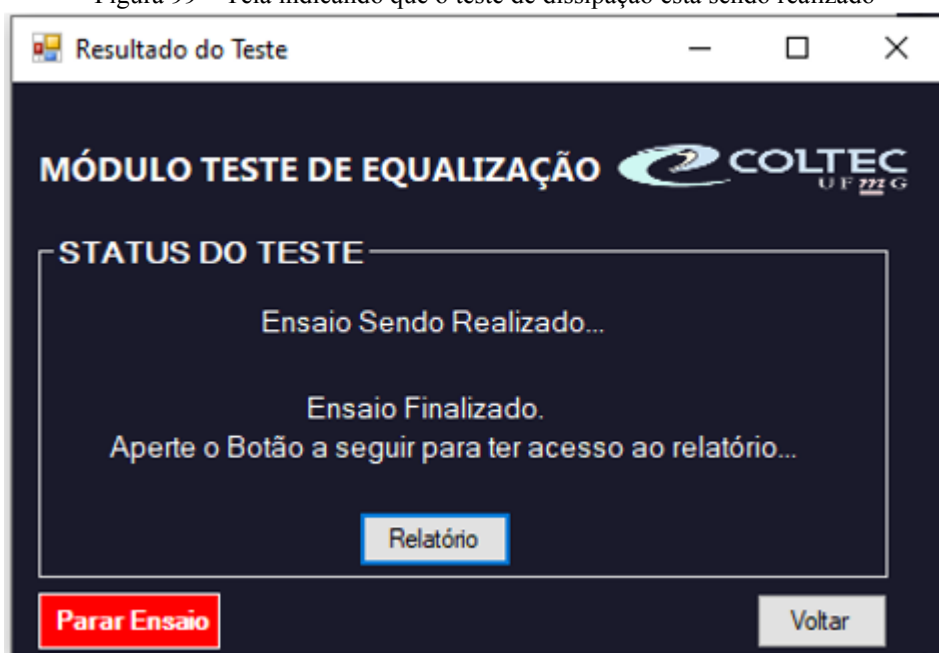
Após o campo de entrada de dados, a tela exibe o campo "Instruções para Execução do Ensaio". Neste campo, o operador deve pressionar o botão "Iniciar Ensaio". Neste momento, o operador deve dirigir-se ao instrumento e inserir a quantidade de água indicada pelo software no mesmo campo mencionado anteriormente. O software registra todos os dados dos

instrumentos e os armazena no arquivo nomeado na primeira tela. Quando o operador aciona o botão "Iniciar Ensaio", uma nova tela é exibida.

A Figura 99 apresenta esta nova tela. Ela possui um campo onde a mensagem "Ensaio Sendo Realizado" é exibida enquanto o ensaio ainda está em andamento. A mensagem "Ensaio Finalizado" e "Aperte o Botão a seguir para ter acesso ao relatório..." é exibida somente quando o ensaio é concluído, e o botão "Relatório" é habilitado apenas nesta condição.

Foram estabelecidos dois critérios de parada para que o software finalizasse o ensaio. O primeiro critério é se o valor de $\Delta H/\Delta H_0$ for igual a 0,00, ou seja, quando toda carga adicional for dissipada. O segundo critério é se passar 24 horas, que foi o tempo limite determinado para a realização do ensaio. É importante destacar que este tempo pode ser ajustado caso o ensaio seja realizado em um piezômetro cujo tempo de equalização esperado seja superior a 8 horas.

Figura 99 – Tela indicando que o teste de dissipação está sendo realizado



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após a conclusão do teste e a exibição da mensagem na tela, o botão "Relatório" é habilitado. Ao acionar este botão o sistema apresentará uma tela gráfica contendo o gráfico do teste de equalização realizado, juntamente com a permeabilidade calculada pelo software utilizando o método de Hvorslev (1951), o qual foi detalhadamente apresentado no Capítulo 2, item 2.5, desta dissertação. No Capítulo 5, item 5.4, é realizado um teste de funcionamento com os respectivos resultados.

5 TESTE EM LABORATÓRIO PARA VALIDAÇÃO DA SOLUÇÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados dos testes de validação realizados no sistema universal de monitoramento de barragens, composto pela "Placa Universal" e pela "Placa de Condicionamento de Sinais". Os testes têm a finalidade de verificar a funcionalidade e precisão das leituras dos dispositivos, bem como validar o sistema de Gestão e Processamento de Dados, responsável por receber, armazenar e apresentar estas leituras. E o módulo exclusivo de semiautomação dos testes de equalização em piezômetros do tipo *standpipe* também foi validado.

Foram realizados testes na "Placa Universal" para confirmar a disponibilidade de tensão, o correto funcionamento das portas de comunicação, a interação com módulos e sensores, bem como a capacidade de conexão e transmissão automática das leituras ao servidor.

Na Placa de Condicionamento de Sinais, os testes validaram a capacidade de leitura dos sensores de corda vibrante, a interação correta com a "Placa Universal" e a precisão das leituras. Também foram realizados testes comparativos com uma solução comercial e validação experimental usando um gabarito de teste com um piezômetro de corda vibrante.

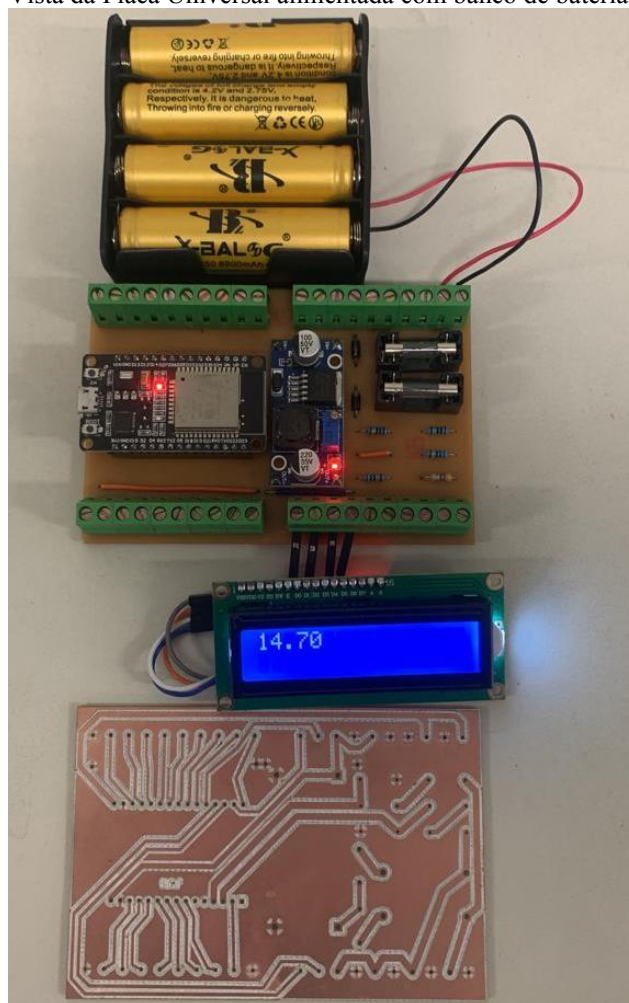
O sistema de Gestão e Processamento de Dados foi testado para garantir a recepção, armazenamento e apresentação corretos das leituras realizadas pelos dispositivos. Os resultados destes testes fornecem uma avaliação abrangente do desempenho do sistema de monitoramento de barragens, permitindo ajustes e melhorias necessárias para atender aos requisitos de forma precisa e segura.

5.2 EXPERIMENTOS DE LABORATÓRIO COM A PLACA UNIVERSAL: TESTES E RESULTADOS

O primeiro teste realizado na "Placa Universal" teve três objetivos principais. O primeiro objetivo foi validar a capacidade da placa de ser alimentada por banco de baterias e verificar seu comportamento nesta condição. O segundo objetivo foi verificar o correto funcionamento da interface de comunicação I2C, uma vez que o LCD adicionado na montagem, utiliza este protocolo. O terceiro objetivo foi validar o comportamento adequado dos divisores de tensão resistivos criados para possibilitar a leitura de tensão tanto das baterias quanto das fontes de alimentação que podem ser conectadas à "Placa Universal".

A Figura 100 mostra a montagem do circuito utilizado para validar as funcionalidades mencionadas anteriormente. Na mesma figura é apresentada a parte inferior de um protótipo de "Placa Universal" que estava sendo desenvolvido no dia em que o teste descrito foi realizado, fornecendo informações adicionais.

Figura 100 – Vista da Placa Universal alimentada com banco de baterias com 4 células



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O teste realizado é mostrado na Figura 101 apresentando resultados satisfatórios. Durante este teste foram validadas as seguintes funcionalidades: a comunicação I2C dos pinos com a ligação e exibição dos dados pelo LCD, o correto funcionamento da "Placa Universal" quando alimentada por um banco de baterias, e o adequado desempenho dos divisores resistivos adicionados para possibilitar a leitura das tensões de alimentação.

Com o objetivo de validar a precisão e a acurácia da leitura das tensões de alimentação da "Placa Universal", um aspecto importante no desenvolvimento de dispositivos IoT, onde a alimentação muitas vezes é um ponto crítico, foram realizados testes adicionais. Nestes testes,

a "Placa Universal" foi conectada a um display LCD I2C e alimentada por uma fonte de alimentação com controle de tensão.

Durante os testes, a "Placa Universal" foi alimentada com diferentes níveis de tensão, dentro dos limites de projeto, utilizando a fonte de bancada com ajuste preciso de tensão, variando de 0 a 36Vcc. O objetivo era validar tanto os circuitos dimensionados na "Placa Universal" para a leitura da tensão de alimentação quanto a comunicação I2C realizada pela placa para exibir a tensão no display.

Conforme pode ser observado nas Figura 101 e Figura 102 a seguir, os testes foram eficazes. A diferença entre a tensão emitida pela fonte e a tensão apresentada no display foi de menos de 3 pontos percentuais, demonstrando uma boa precisão na leitura das tensões de alimentação.

Figura 101 – Placa Universal sendo alimentada com 12Vcc com fonte de tensão controlada



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 102 – Placa Universal sendo alimentada com 12Vcc com fonte de tensão controlada



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com o objetivo de demonstrar a capacidade de escalabilidade e universalidade do sistema, foi elaborada uma montagem de teste para realizar leituras de um sensor de pressão piezoresistivo. O sensor utilizado nos testes é uma sonda de nível de pequeno diâmetro da marca Velki. Este sensor utiliza um transdutor piezoresistivo para capturar as variações de pressão exercidas pela água em seu diafragma. Para o funcionamento adequado, o sensor requer uma alimentação contínua e fornece um sinal de corrente variável na faixa de 4 a 20 mA.

Para viabilizar a interface entre o sensor e a "Placa Universal", foi utilizado um módulo de conversão corrente/tensão disponível no banco de componentes do LITE. O módulo, ilustrado na Figura 103, tem como finalidade condicionar o sinal de corrente proveniente de sensores piezoresistivos ou que apresentam variação de corrente na faixa de 4 a 20 mA. Ele converte este sinal em um sinal de tensão variável, mantendo proporções aproximadas às do sinal de corrente. Desta forma, torna-se possível realizar a leitura destes sensores pelas portas disponíveis na "Placa Universal" (ESP32).

Figura 103 – Módulo conversor 4 a 20mA



Fonte: Eletrogate - <https://www.eletrogate.com/modulo-conversor-corrente-para-tensao-xy10>

Para a realização dos testes foi elaborada um gabarito mostrada na Figura 105, além disso, foi utilizado o sensor mostrado na Figura 104 para realização dos testes. Este gabarito de teste que será detalhado no item 5.5, todavia, simplificada ele é composto por um tubo de PVC com aproximadamente 1,80 metros de altura. Dentro deste tubo foi inserida a sonda de nível Velki mencionada anteriormente. Também foi adicionado um volume de água até atingir aproximadamente 1,09 metros de coluna de água (mca) dentro do tubo.

A sonda de nível utilizada nos testes é apresentada de forma resumida na Figura 104, que fornece algumas informações relevantes sobre o dispositivo.

Figura 104 – Sonda de nível Velki saída de 4 a 20mA



Fonte: Velki (<https://velki.com.br/pt/medidores-de-nivel-liquido>).

O gabarito mencionado anteriormente, possui duas mangueira transparente que estão conectada diretamente ao tubo de PVC mencionado. Esta configuração permite acompanhar visualmente a adição de carga por meio de uma fita métrica colocada no gabarito, entre as duas mangueiras transparentes (Figura 105). Desta forma, é possível registrar manualmente a medida visualmente e fazer comparações com as medições realizadas pelos dispositivos.

Figura 105 – Gabarito montado para realização do teste de leitura de um sensor de pressão que varia corrente de 4 a 20mA

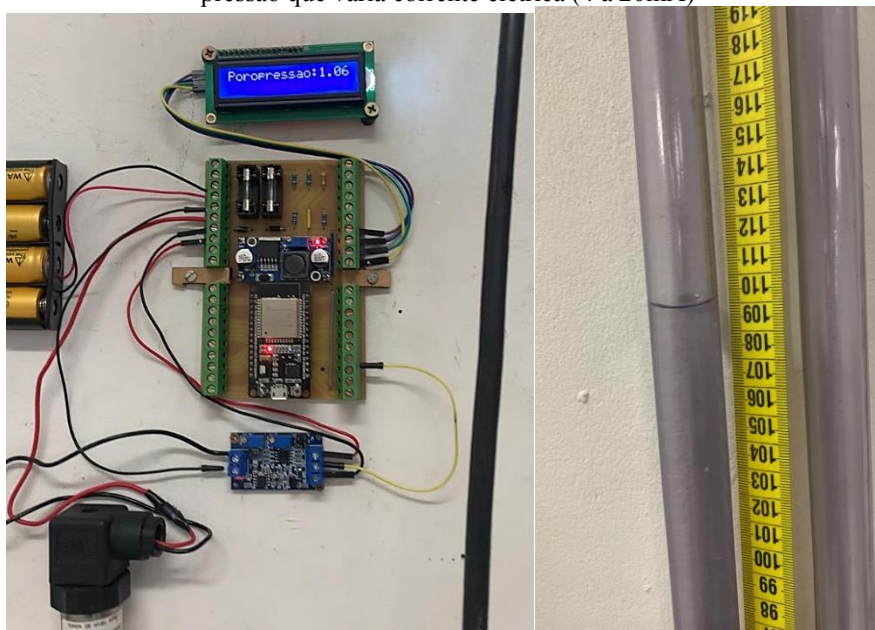


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 106 é apresentada a montagem feita para realizar o teste com a "Placa Universal", alimentada por um banco de baterias. A montagem consiste na conexão da "Placa

Universal" com um display I2C para exibir as leituras, bem como a ligação do módulo 4 a 20mA à placa e ao sensor da Velki. Também é mostrada a coluna de água utilizada no teste do sensor, com uma altura de 1,09 mca. O display indica a leitura desta coluna de água como sendo 1,06mca, resultando em um erro percentual de leitura inferior a 0,5 pontos percentuais.

Figura 106 – Detalhe da ligação feita entre a Placa Universal, o módulo para leitura de corrente e o transdutor de pressão que varia corrente elétrica (4 a 20mA)



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após a realização do teste detalhado mencionado anteriormente, foi realizado um teste adicional para validar as leituras. Neste teste, a coluna do gabarito foi preenchida com uma carga de 1,5 mca. Utilizando a válvula localizada na extremidade inferior do tubo de PVC do gabarito, a carga adicionada foi gradualmente escoada, enquanto o circuito montado registrava as leituras da sonda Velki e as transmitia para o computador conectado diretamente à "Placa Universal".

Durante o teste foi estabelecido um intervalo de leitura de 30 segundos para o sensor Velki, enquanto a válvula era aberta em intervalos de 2 minutos. Este processo foi repetido até que a carga atingisse 0,5mca, momento em que o tubo foi completamente esvaziado. Para fins de comparação com as leituras realizadas pelo sensor piezôresistivo e registradas pela "Placa Universal", foram feitas leituras visuais da carga no gabarito a cada variação de carga durante o teste.

Os dados resultantes deste teste de validação da "Placa Universal", realizando a leitura de um sensor piezôresistivo, estão apresentados na Tabela 10 a seguir.

Tabela 10 – Tabela de dados do teste de validação da Placa Universal fazendo a leitura de um sensor piezôresistivo.

Tempo	Leitura Sensor 4 a 20mA	Leitura registrada no gabarito	Diferença percentual entre as leituras
00:00:00	1,45	1,5	3,33%
00:00:30	1,46	1,5	2,67%
00:01:00	1,46	1,5	2,67%
00:01:30	1,46	1,5	2,67%
00:02:00	1,46	1,5	2,67%
00:02:30	1,25	1,3	3,85%
00:03:00	1,26	1,3	3,08%
00:03:30	1,25	1,3	3,85%
00:04:00	1,25	1,3	3,85%
00:04:30	1,08	1,1	1,82%
00:05:00	1,09	1,1	0,91%
00:05:30	1,07	1,1	2,73%
00:06:00	1,09	1,1	0,91%
00:06:30	0,87	0,9	3,33%
00:07:00	0,86	0,9	4,44%
00:07:30	0,87	0,9	3,33%
00:08:00	0,87	0,9	3,33%
00:08:30	0,68	0,7	2,86%
00:09:00	0,68	0,7	2,86%
00:09:30	0,68	0,7	2,86%
00:10:00	0,68	0,7	2,86%
00:10:30	0,49	0,5	2,00%
00:11:00	0,5	0,5	0,00%
00:11:30	0,5	0,5	0,00%
00:12:00	0,49	0,5	2,00%
00:12:30	0,02	0	0,00%
00:13:00	0,01	0	0,00%
00:13:30	0	0	0,00%
00:14:00	0	0	0,00%
Média:			2,24%

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Observou-se uma diferença média de 2,24% entre as leituras visuais realizadas no gabarito e as leituras registradas pelo sensor Velki conectado à "Placa Universal". Com base nestes resultados, conclui-se que a "Placa Universal" foi testada e validada, estando apta para ser utilizada em conjunto com a Placa de Condicionamento de Sinais.

Estes testes confirmaram a funcionalidade e precisão da "Placa Universal", demonstrando sua capacidade de realizar leituras precisas do sensor piezoresistivo e de fornecer

resultados coerentes. A diferença média de 2,24% indica uma boa concordância entre as leituras obtidas pelo sistema e as leituras visuais realizadas no gabarito.

Desta forma, os resultados obtidos fornecem confiança na utilização da "Placa Universal" como parte integrante do sistema de monitoramento, demonstrando sua eficácia na leitura e transmissão de dados provenientes de sensores. Com a validação bem-sucedida, é possível prosseguir para a próxima etapa de testes, que envolverá a avaliação conjunta com a Placa de Condicionamento de Sinais.

Em suma, os testes de validação realizados confirmaram a viabilidade e adequação da "Placa Universal", destacando seu potencial como componente essencial no sistema de monitoramento em questão.

5.3 EXPERIMENTOS DE LABORATÓRIO COM A PLACA DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS: TESTES E RESULTADOS

Após a validação da funcionalidade básica da "Placa Universal" no item 3.2.2.5, foi realizado um novo conjunto de testes com o objetivo de analisar em maior detalhe o sinal proveniente de um sensor de corda vibrante, que foi condicionado pela placa. A mesma montagem utilizada anteriormente foi feita por uma segunda vez. Nesta configuração, a "Placa Universal" estava conectada à Placa de Condicionamento de Sinais que, por sua vez, estava ligada a um piezômetro de corda vibrante, do modelo 4500C da Geokon (Figura 107).

Figura 107 – Piezômetro de corda vibrante utilizado em todos os testes



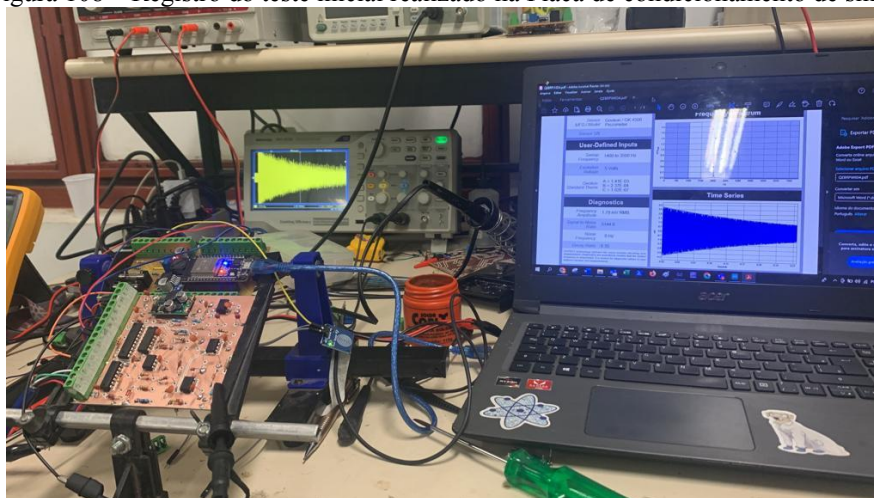
Fonte: Geokon (2014)

A Figura 108 apresenta em detalhes o sinal capturado pelo osciloscópio, o qual foi condicionado pela Placa de Condicionamento de Sinais. É importante ressaltar que foi realizado um teste para tentar registrar o sinal primário proveniente do sensor de corda vibrante ao excitá-

lo, porém, sem sucesso. Devido à baixa amplitude deste sinal (aproximadamente 4 mVpp) não foi possível obter êxito neste teste específico.

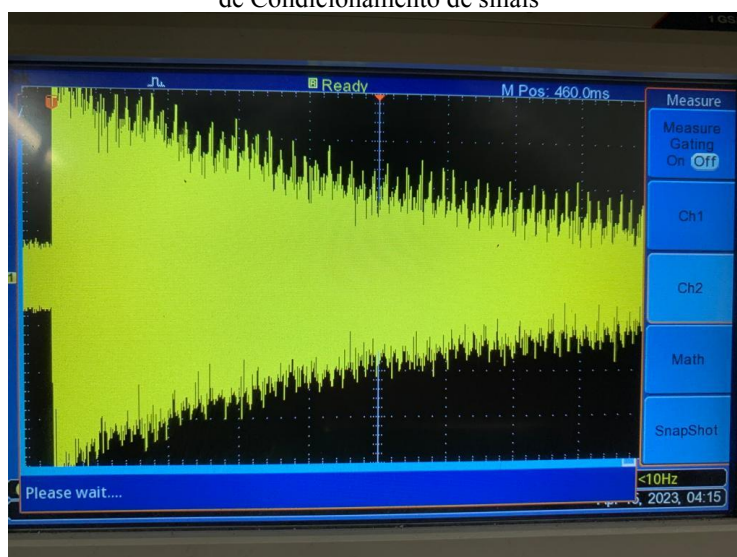
Por outro lado, foi possível registrar o sinal utilizando a Placa de Condicionamento de Sinais. A partir deste registro foi possível comprovar a eficácia do circuito projetado e realizar comparações com outras curvas de sinais de sensores de corda vibrante, disponíveis em um banco de dados particular do autor, conforme apresentado na Figura 109.

Figura 108 – Registro do teste inicial realizado na Placa de condicionamento de sinais



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 109 – Sinal de resposta do sensor de corda vibrante 4500C registrado no osciloscópio por meio da Placa de Condicionamento de sinais

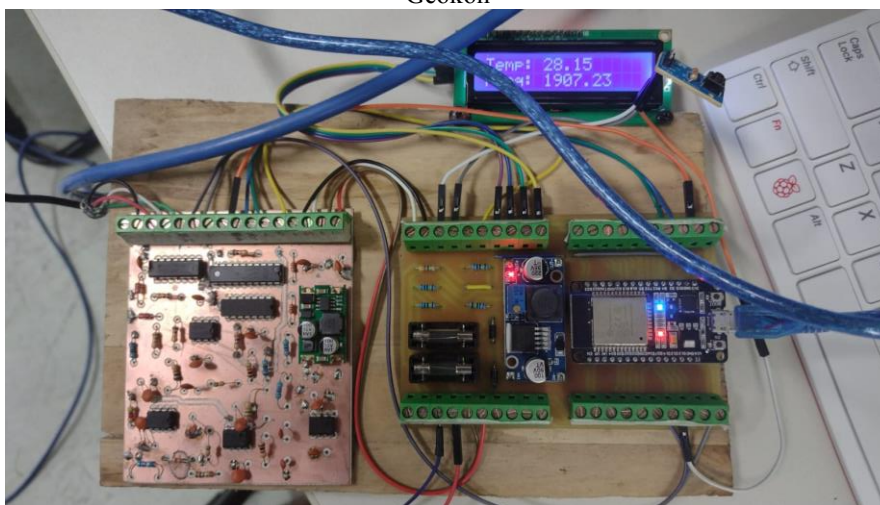


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após o êxito no registro do sinal proveniente do sensor de corda vibrante, A montagem original foi desligada e um segundo circuito de teste foi elaborado, este circuito é mostrado na Figura 110. Nesta figura é possível observar a fixação da "Placa Universal" e da Placa de

Condicionamento de Sinais em um suporte de madeira. Além disto, um display I2C, que já havia sido previamente testado, foi conectado para permitir a visualização local das leituras, dispensando a necessidade de um computador. E um botão foi adicionado a este circuito de teste com o propósito de comandar as leituras. Ao pressionar o botão, o sistema realiza uma leitura do sensor de corda vibrante modelo 4500C.

Figura 110 – Montagem de teste contendo a Placa Universal e a Placa de condicionamento de sinais fixadas em um suporte de madeira e apresentando a leitura de frequência e temperatura do piezômetro de teste 4500C da Geokon



Fonte: Elaborado pelo Autor.

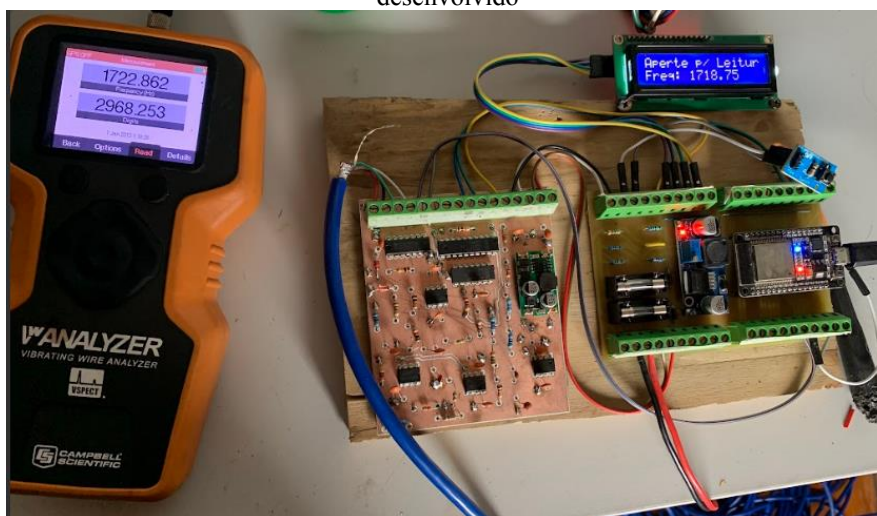
Utilizando o circuito mencionado anteriormente, foram conduzidos testes de comparação entre as leituras do piezômetro de corda vibrante modelo 4500C, utilizando o dispositivo comercial *VWAnalyzer* da CampbellSCI e o dispositivo desenvolvido na pesquisa o *SAMDUMBA*.

De acordo com *Campbell Scientific Brasil (2023)*, o *VWAnalyzer* é um dispositivo utilizado para medições em sensores de corda vibrante. Ele é capaz de ler a frequência e a temperatura destes sensores, converter as medições em unidades de engenharia, fornecer diagnósticos precisos e armazenar os dados em formato PDF e CSV. Sua tela gráfica integrada também permite a verificação das variáveis medidas e do funcionamento dos sensores.

Na Figura 111 é apresentada a montagem de teste com o dispositivo desenvolvido, (*SADUMBA*) tanto fazendo a leitura do dispositivo utilizando o conversor A/D quanto o circuito *Schmitt Trigger* (Estágio 6) e o *VWAnalyzer*. Para este teste foram realizadas 10 leituras com cada um dos dispositivos, com um intervalo de 1 minuto entre cada leitura. O piezômetro 4500C da Geokon foi mantido na mesma posição durante todas as medidas.

Todas as leituras realizadas pelo SADUMBA foram registradas no computador por meio do cabo USB conectado à "Placa Universal", como ilustrado na Figura 111. Os dados incluíam também a leitura de temperatura do dispositivo e leitura de frequências, lidos com o circuito Schmitt Trigger (Estágio 6) que não está visível no display. Da mesma forma, todas as leituras feitas pelo *VWAnalyzer* foram registradas no próprio dispositivo, incluindo os dados de temperatura.

Figura 111– Comparação das leituras do mesmo sensor entre o dispositivo comercial *VWAnalyzer* e o sistema desenvolvido



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Tabela 11 apresenta os dados obtidos no teste descrito anteriormente. Observa-se que nas leituras realizadas com o *VWAnalyzer* há uma variação na última casa decimal, visto que este dispositivo possui 3 algarismos significativos em suas medições. Por outro lado, nas leituras realizadas com o dispositivo SADUMBA com conversor AD não foi identificada nenhuma variação, uma vez que o sistema foi programado para apresentar 2 algarismos significativos após a vírgula. Todavia, as leituras realizadas com o circuito *Schmitt Trigger* apresentaram um percentual de diferença maior, quando comparado ao *VWAnalyzer*, importante destacar que durante os testes a leitura realizada por meio do circuito *Schmitt Trigger* falhou em 3(três leituras), apresentando valores de 60 e 70 Hz.

Tabela 11 – Dados do teste de comparação de leitura

Leituras <i>VWAnalyzer</i> Campbell			Leituras SADUMBA - Conversor A/D			Leituras SADUMBA - Schmitt Trigger		
Hora	Frequência (Hz)	Temp C°	Hora	Frequência (Hz)	Temp C°	Hora	Frequência (Hz)	Temp C°
16:26:00	1.722,862	25,5	16:41:00	1.718,75	27,13	16:41:00	1.703,040	27,13
16:27:00	1.722,860	25,5	16:42:00	1.718,75	27,16	16:42:00	1.703,040	27,16
16:28:00	1.722,863	25,5	16:43:00	1.718,75	27,10	16:43:00	60,000	27,10
16:29:00	1.722,862	25,5	16:44:00	1.718,75	27,33	16:44:00	1.703,040	27,33
16:30:00	1.722,860	25,6	16:45:00	1.718,75	27,13	16:45:00	60,000	27,13
16:31:00	1.722,861	25,58	16:46:00	1.718,75	27,22	16:46:00	1.703,040	27,22
16:32:00	1.722,860	25,6	16:47:00	1.718,75	27,24	16:47:00	1.703,040	27,24
16:33:00	1.722,860	25,62	16:48:00	1.718,75	27,26	16:48:00	60,000	27,26
16:34:00	1.722,864	25,64	16:49:00	1.718,75	27,27	16:49:00	1.703,040	27,27
16:35:00	1.722,866	25,66	16:50:00	1.718,75	27,29	16:50:00	1.703,040	27,29

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Tabela 12 exibe as diferenças percentuais entre as leituras realizadas, revelando o desempenho satisfatório do dispositivo SADUMBA em comparação com as leituras do *VWAnalyzer*. Verifica-se uma diferença inferior a 1% nas leituras de frequência, demonstrando a precisão do SADUMBA nesta medida. No entanto, foram identificadas diferenças percentuais maiores nas medições de temperatura, com uma média acima de 6%, conforme destacado na Tabela 12. Embora esta discrepância seja considerada aceitável neste estudo, é um aspecto que requer atenção para possíveis melhorias futuras.

Os erros identificados na leitura realizada pelo circuito Schmitt Trigger podem ser atribuídos à inadequação da amplitude do sinal retornado pelo sensor após a excitação. Este fenômeno ocorre quando o sinal de excitação não se encontra suficientemente próximo da frequência de ressonância do sensor. Como consequência, o sinal devolvido pelo sensor apresenta uma amplitude muito reduzida, incapaz de ativar os limiares de histerese do Schmitt Trigger. Em contraste, o circuito que utiliza o conversor A/D demonstra uma sensibilidade superior a pequenas amplitudes, permitindo a amostragem e conversão desses sinais com eficácia.

Tabela 12 – Diferenças percentuais entre as leituras realizadas com os dispositivos SADUMBA e *VWAnalyzer*

Diferença percentual entre as leituras de frequência SADUMBA Schmitt Trigger/ <i>VWAnalyzer</i>	Diferença percentual entre as leituras de frequência SADUMBA Conversor AD/ <i>VWAnalyzer</i>	Diferença percentual entre as leituras de temperatura SADUMBA/ <i>VWAnalyzer</i>
1,15%	0,24%	6,01%
1,15%	0,24%	6,11%

96,52%	0,24%	5,90%
1,15%	0,24%	6,70%
95,47%	0,24%	5,64%
1,15%	0,24%	6,03%
1,15%	0,24%	6,01%
96,52%	0,24%	6,00%
1,15%	0,24%	5,98%
1,15%	0,24%	5,97%
29,66%	0,24%	6,04%

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com base nos resultados apresentados pode-se comprovar um melhor desempenho do conversor A/D para leitura dos sensores de corda vibrante. E tanto a Placa de Condicionamento de Sinais quanto a "Placa Universal", carregada com a Firmware desenvolvida, demonstraram funcionalidade e desempenho satisfatórios nos testes realizados. Desta forma, a validação completa do Sistema SADUMBA envolveu a realização de outros testes para verificar o funcionamento integral do sistema, incluindo o sistema de Gestão e processamento desenvolvido com Node-Red, bem como o módulo de teste de equalização em piezômetros do tipo *standpipe*. Estes testes de validação serão detalhados nos próximos itens, a fim de fornecer uma comprovação abrangente do sistema como um todo.

5.4 EXPERIMENTOS DE LABORATÓRIO COM O MÓDULO DE SEMIAUTOMATIZAÇÃO PARA TESTE DE EQUALIZAÇÃO EM PIEZÔMETROS DO TIPO *STANDPIPE*: TESTES E RESULTADOS

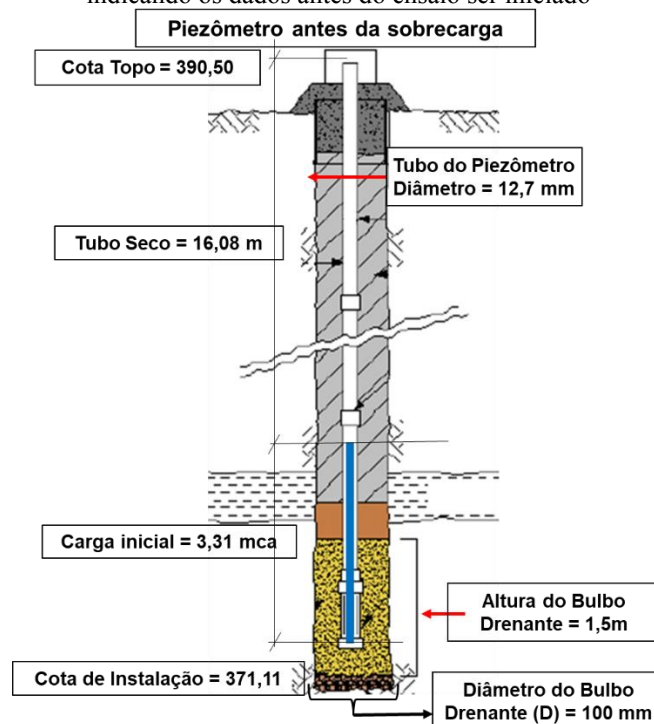
O módulo de teste de equalização de piezômetro foi avaliado utilizando dados reais de um piezômetro, denominado neste estudo como "Piezômetro Genérico". Estes dados foram obtidos em uma experiência profissional anterior do autor, sendo que informações específicas sobre o local de implantação do instrumento e outros detalhes do projeto não serão divulgadas para preservar a confidencialidade dos dados.

A Figura 112 apresenta um croqui com os dados do Piezômetro Genérico utilizado como exemplo no teste. As informações relevantes são as seguintes:

- Cota topo: 390,50 m;
- Cota de instalação: 371,11 m;
- Diâmetro tubo: 12,7 mm;
- Carga inicial antes do ensaio: 3,31 mca;

- Tubo seco: 16,08 m (leitura feita com Sonda piu);
- Altura do Bulbo Drenante: 1,5 m;
- Diâmetro do Bulbo : 100 mm;
- Densidade do solo saturado: $\gamma_{\text{sat}} = 18,5 \text{ kN/m}^3$;
- Peso específico natural do solo: $\gamma_n = 17,5 \text{ kN/m}^3$;
- Peso específico da água: $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$.

Figura 112 – Croqui do piezômetro Casagrande Genérico utilizado para teste do módulo teste de equalização indicando os dados antes do ensaio ser iniciado



Fonte: Modificado de Cerqueira (2017).

A partir dos dados fornecidos anteriormente e aplicando as equações deduzidas no Capítulo 2, item 2.5, torna-se possível calcular o acréscimo máximo de carga para a execução do ensaio de equalização no piezômetro genérico. A seguir, nas equações 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, são apresentados todos os cálculos realizados com os dados fornecidos previamente.

$$\sigma'_v = \gamma_n \cdot L + \gamma_{\text{sat}} \cdot H_o - \gamma_w \cdot H_o \quad (5.1)$$

$$\sigma'_v = 17,5 \times 16,08 + 18,5 \times 3,31 - 9,807 \times 3,31$$

$$\sigma'_v = 310,174 \text{ kN/m}^3$$

$$K'_o = 0,95 - \sin \phi \quad (5.2)$$

$$K'o = 0,95 - \sin 33^\circ$$

$$K'o = 0,95 - 0,545$$

$$K'o = 0,405$$

Assim:

$$\Delta H_o < K'o \times \sigma'_v / \gamma_w \quad (5.3)$$

$$\Delta H_o < 0,405 \times \left(\frac{310,174}{9,807} \right)$$

$$\Delta H_o < 12,82\text{m}$$

$$V = \Delta H_o \times A \quad (5.4)$$

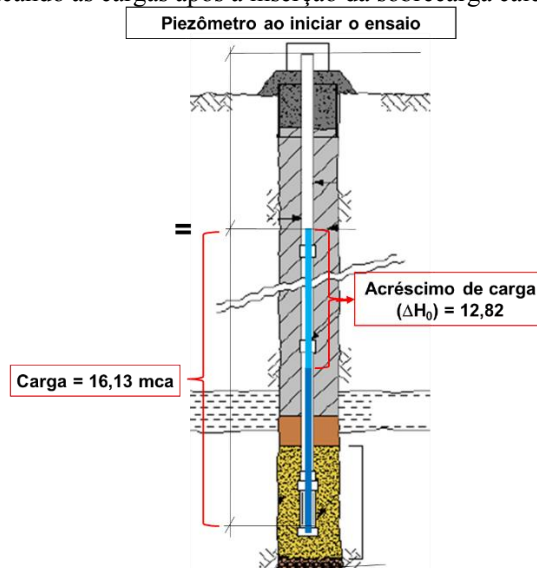
$$V = 12,82 \times 0,00127$$

$$V = 12,82 \times 0,000127 \times 1000$$

$$V = 1,62 \text{ Litros}$$

Deste modo, a partir dos dados fornecidos pelo piezômetro genérico, foi realizado o cálculo de uma sobrecarga máxima de aproximadamente 12,82 metros de coluna de água, o que equivale a um volume de água "V" de 1,62 litros. Este volume de água calculado é adicionado ao piezômetro genérico, e na Figura 113 a seguir é apresentado o esboço com as variáveis do ensaio após a inserção da carga adicional calculada.

Figura 113 – Croqui do piezômetro Casagrande Genérico utilizado para teste do módulo teste de equalização indicando as cargas após a inserção da sobrecarga calculada



Fonte: Modificado de Cerqueira (2017).

Após a aplicação da carga adicional calculada foram conduzidas leituras sequenciais utilizando uma sonda piu nos seguintes tempos: são $t_1 = 30$ s, $t_2 = 1$ min, $t_3 = 2$ min, $t_4 = 4$ min, $t_5 = 8$ min, $t_6 = 15$ min, $t_7 = 30$ min. Os resultados destas leituras, obtidos no ensaio de equalização do piezômetro genérico, são apresentados na Tabela 13 a seguir. Esta tabela é composta por quatro colunas, a saber:

- Tempo (min): intervalo de tempo entre as leituras realizadas;
- Carga (m.c.a): carga calculada no piezômetro durante o ensaio, com base nas leituras obtidas pela sonda piu;
- Carga adicional (ΔH): carga adicional calculada ao longo do ensaio, a partir das leituras realizadas com a sonda piu;
- $\Delta H/\Delta H_0$: percentual do acréscimo de carga dissipado durante o ensaio em relação à carga inicial.

Tabela 13 – Tabela de dados do ensaio de equalização do piezômetro genérico feito manualmente

Tempo (min)	Carga (m.c.a)	Carga Adicional DH	$\Delta H/\Delta H_0$
0,0	16,13	12,81	1,000
0,5	14,57	11,26	0,897
1,0	13,04	9,73	0,775
2,0	10,61	7,3	0,582
4,0	8,9	5,59	0,445
8,0	5,51	2,2	0,175
15,0	3,77	0,46	0,037
30,0	3,32	0,01	0,001

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para determinar o coeficiente de permeabilidade “k” utilizando as equações do método de Hvorslev, M.J – 1951, e os dados do ensaio apresentados na Tabela 13, são necessárias três variáveis. Estas variáveis foram previamente deduzidas e explicadas no Capítulo 2, item 2.5, e são detalhadas a seguir na equação 5.5:

$$K = \frac{A}{F \times T} \quad (5.5)$$

A – Área da seção transversal do tubo de leitura em (cm²);

F – Fator de forma que depende da forma, dimensões, superfície de drenagem do bulbo e seu posicionamento em relação a eventual camada impermeável (cm);

T – Tempo de retardo Básico (s).

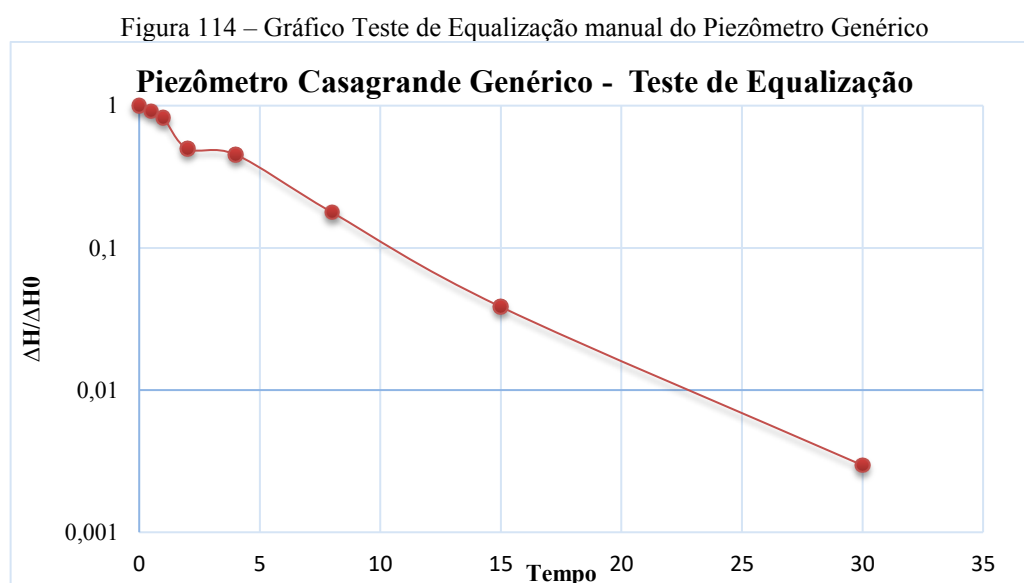
A área da seção transversal do tubo foi calculada anteriormente e é igual a $A=0,000127\text{m}^2$, o Fator de Forma é calculado a seguir na equação (5.6).

$$F = \frac{2\pi Lb}{\ln \left[\frac{Lb}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{Lb}{D} \right)^2} \right]} \quad (5.6)$$

$$F = \frac{2\pi \times 150}{\ln \left[\frac{150}{10} + \sqrt{1 + \left(\frac{150}{10} \right)^2} \right]}$$

$$F = 277,01 \text{ cm}$$

Com base nos dados fornecidos na Tabela 14, é possível calcular o Tempo de Retardo Básico (T) correspondente a “ $\Delta H/\Delta H_0$ ” = 0,37. Observando os valores de tempo de 4 minutos, com “ $\Delta H/\Delta H_0$ ” = 0,445, e 8 minutos, com “ $\Delta H/\Delta H_0$ ” = 0,175, é realizada uma interpolação linear entre estes pontos, resultando em um valor de tempo de 5,21 minutos. Portanto, o Tempo de Retardo Básico “T” é igual a 5,21 minutos, equivalente a “ $\Delta H/\Delta H_0$ ” = 0,37. O gráfico do ensaio de equalização é apresentado na Figura 114 a seguir.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Assim:

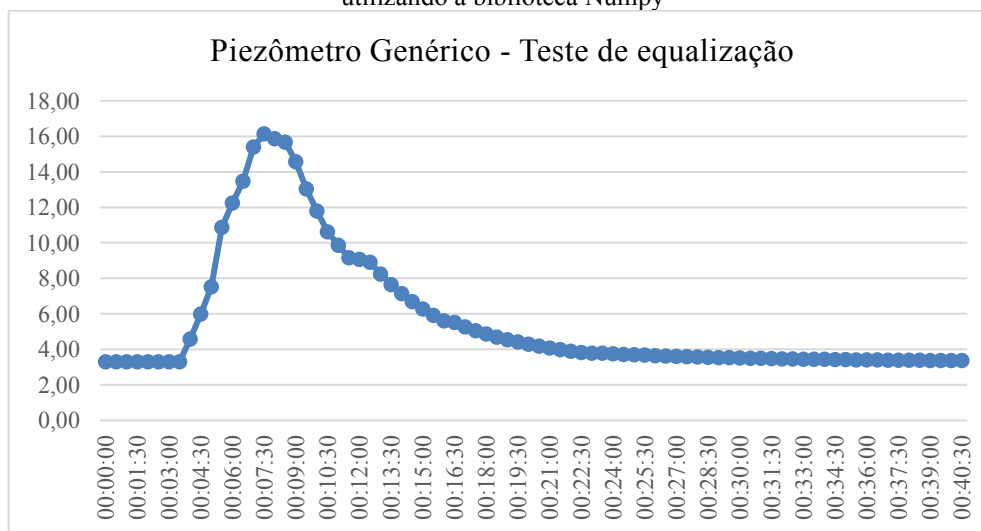
$$K = \frac{1,27 \text{ cm}^2}{277,01 \text{ cm} \times 312,6 \text{ s}}$$

$$K \approx 1,47 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

De acordo com os dados do ensaio apresentados na Figura 114 foi possível calcular a permeabilidade com um valor aproximado de $1,47 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$. Estes dados obtidos a partir do piezômetro genérico foram utilizados para validar o módulo de semiautomação de teste de equalização em piezômetro.

Utilizando os dados da Tabela 13 e a biblioteca Numpy do Python, com sua capacidade de interpolação que permite construir um novo conjunto de dados a partir de um conjunto discreto de pontos conhecidos, foi possível criar um conjunto de dados com 66 pontos preenchendo os dados ausentes por meio da interpolação. Isto possibilitou gerar um conjunto de dados com intervalo de 30 segundos entre as leituras simuladas, utilizando as 8 leituras de carga apresentadas na Tabela 13. O gráfico de carga e descarga simulados para este teste é apresentado na Figura 115 a seguir.

Figura 115 – Gráfico plotado da variação de carga do Piezômetro Genérico com os dados faltantes interpolados utilizando a biblioteca Numpy



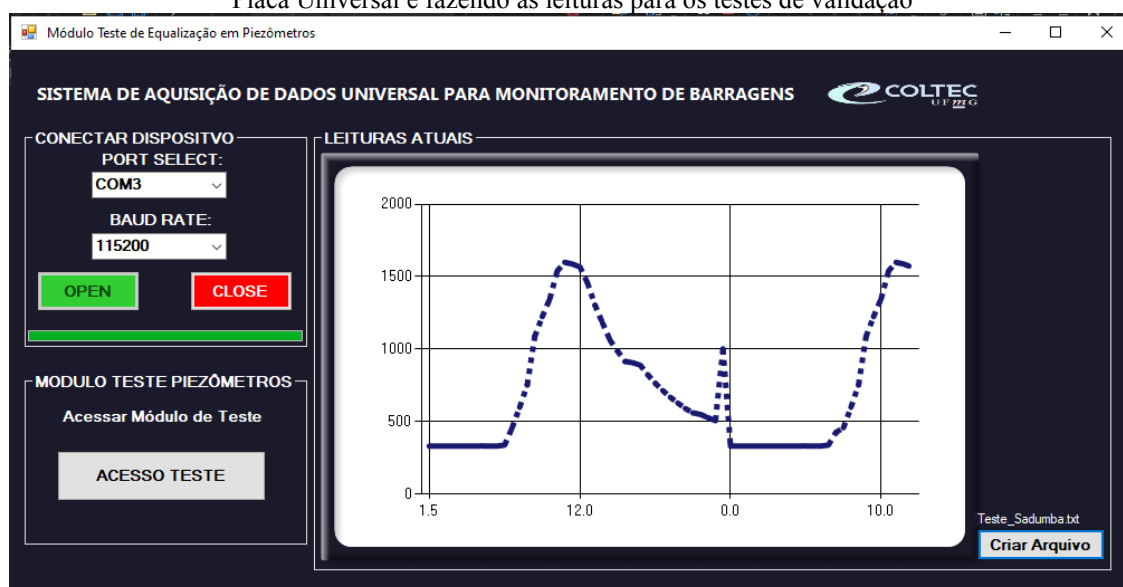
Fonte: Elaborado pelo Autor.

A partir do novo conjunto de dados criado, composto por 66 medidas de carga com intervalos de 30 segundos, estes dados foram carregados em um script na IDE do Arduino e transferidos para a "Placa Universal". O script foi programado para gerar leituras com os valores da série criada, disponibilizando estas leituras a cada 30 segundos na porta Serial. Desta forma, foi possível simular a geração de leituras pela "Placa Universal" e realizar o teste de validação.

Na Figura 116 é apresentada a primeira tela do módulo desenvolvido que mostra uma conexão bem-sucedida com a "Placa Universal", indicada pela barra verde abaixo do botão "OPEN". As leituras coletadas da "Placa Universal" são exibidas ciclicamente no gráfico da primeira tela.

Seguindo as instruções descritas no Capítulo 4, item 4.3, o arquivo para armazenar as leituras foi selecionado no botão "Criar Arquivo", sendo nomeado como "Teste_Sadumba.txt", como pode ser observado na Figura 116. Após a criação do arquivo, o botão "Acesso Teste" foi acionado.

Figura 116 – Tela inicial do módulo teste de equalização em piezômetros com a conexão estabelecida com a Placa Universal e fazendo as leituras para os testes de validação



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após acionar o botão "Acesso Teste", a Tela mostrada na Figura 117 foi aberta, na qual todos os parâmetros de entrada mencionados anteriormente neste item foram inseridos, conforme pode ser observado no lado esquerdo da Figura 117 mencionada. Após a digitação de todos os dados de entrada, o botão "Calcular" foi acionado.

Figura 117 – Tela do teste de equalização mostrando os dados do teste inseridos e os dados calculados pelo sistema

ENTRADA DE DADOS	
Nome do Instrumento:	PC - Genérico
Diâmetro do tubo:	12,7 (mm)
Cota de Topo Tubo:	390,50 (m)
Cota de instalação:	371,11 (m)
Altura do bulbo drenante:	1,5 (m)
Diâmetro do bulbo drenante:	100 (mm)
Carga inicial:	3,31 (mca)
Peso específico natural do solo:	17,5 (kN/m³)
Densidade do solo saturado:	18,5 (kN/m³)
Peso específico da água:	10 (kN/m³)
Ângulo de atrito efetivo do solo:	33 (°)
Coefficiente de empuxo em repouso:	(adimensional)

INSTRUÇÕES PARA EXECUÇÃO DO ENSAIO	
Instruções para execução do ensaio	
<i>Mensagem ao operador...</i>	
Insira 1,59 Litros de água no Piezômetro PC - Genérico	
Os Dados Calculados estão apresentados a seguir:	
Comprimento Total do Tubo:	19,39 (m)
Comprimento do Tubo Seco Antes do Ensaio:	16,08 (m)
Tensão efetiva vertical:	0,0310 (kPa)
Acrescimento de Carga:	12,55 (mca)
Área da Seção Transversal do Tubo:	0,000127 (m²)
Volume de água a ser adicionado:	1,59 (L)
Ângulo de atrito efetivo do solo:	33 (°)
Coefficiente de empuxo em repouso:	0,4054 (adimensional)

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com todos os dados inseridos e o acionamento do botão de cálculo, o módulo realiza o cálculo do volume de água a ser adicionado no Piezômetro Genérico para a realização do ensaio. É importante ressaltar que o volume de água calculado pelo módulo é igual ao volume calculado e demonstrado anteriormente, assim como o valor da coluna de água a ser adicionada. Após o cálculo dos dados, o botão "Iniciar Ensaio" foi acionado.

A partir deste momento, todos os dados provenientes da "Placa Universal" são registrados no arquivo "Teste_Sadumba.txt" com leituras a cada 30 segundos. Estas leituras são registradas e a Tela apresentada na Figura 118 é exibida. Enquanto nenhum dos critérios de parada descritos no Capítulo 4, item 4.3 forem atingidos, a tela do teste permanecerá como mostrado na Figura 118.

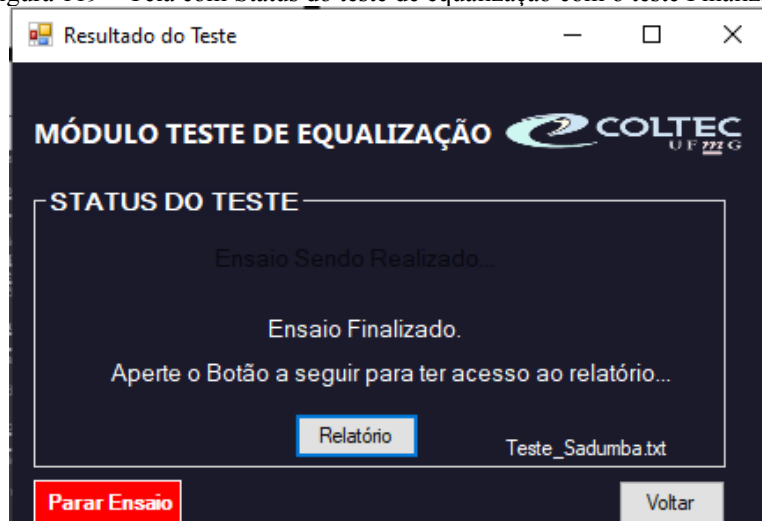
Figura 118 – Tela com de Status do teste de equalização com o teste em andamento



Fonte: Elaborado pelo Autor.

No entanto, quando um dos critérios de parada estabelecidos for satisfeito, um código em Python analisará os dados do arquivo "Teste_Sadumba.txt" e realizará todos os cálculos necessários. Em seguida, a tela de status do teste será atualizada, conforme mostrado na Figura 119, indicando que o botão "Relatório" pode ser acionado para obter acesso aos resultados do ensaio.

Figura 119 – Tela com Status do teste de equalização com o teste Finalizado



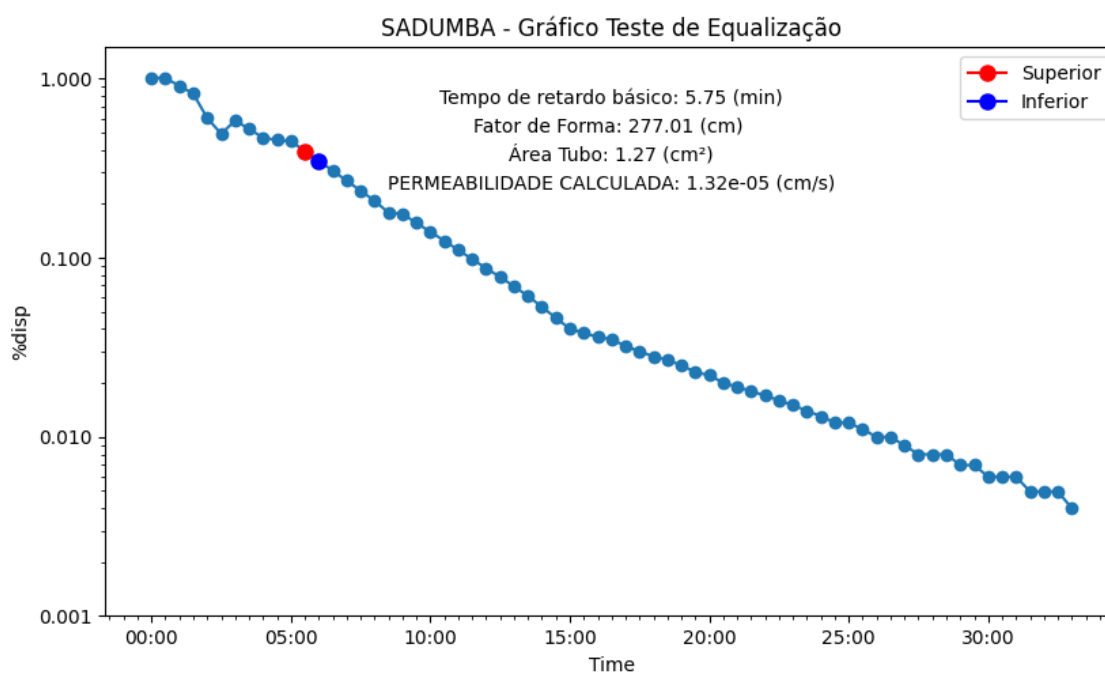
Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ao acionar o botão "Relatório", uma tela semelhante à apresentada na Figura 120 será exibida, contendo o gráfico do percentual de acréscimo de carga dissipado. O eixo y do gráfico está em escala logarítmica, enquanto o tempo é representado no eixo x em escala linear. E os dois pontos interpolados para encontrar o valor do tempo correspondente a $\%disp = 0,37$ são destacados no gráfico. Adicionalmente, os dados calculados são exibidos no gráfico,

juntamente com o valor do coeficiente de permeabilidade "k", que é destacado, como mostrado a seguir:

$$K \approx 1,32 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

Figura 120 – Gráfico de resultados que é gerado pelo módulo teste de dissipação contendo o resultado dos ensaios do piezômetro Genérico



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Portanto, pode-se concluir que o módulo semiautomatizado para teste de equalização em piezômetros do tipo *standpipe* demonstrou ser efetivo em seus cálculos. Através da interpolação dos dados reais do piezômetro genérico foi possível obter valores de permeabilidade que estão consideravelmente próximos entre si. Isto indica que o módulo é capaz de fornecer resultados precisos e confiáveis para a estimativa da permeabilidade do solo.

E o módulo de teste de dissipação mostrou um bom funcionamento, desempenhando todas as etapas de cálculo conforme determinado em sua concepção. Durante a realização do ensaio, o módulo se comportou de acordo com as especificações estabelecidas, registrando as leituras de forma adequada e armazenando os dados no arquivo correspondente.

Estes resultados são de grande importância para o campo da geotecnia, visto que fornecem uma ferramenta eficiente para a realização de testes de equalização em piezômetros, permitindo uma melhor compreensão das características hidrotécnicas dos solos. A utilização deste módulo contribui para a obtenção de dados mais precisos e confiáveis, auxiliando no

dimensionamento e monitoramento de obras geotécnicas, bem como na avaliação do controle de fluxo e estabilidade das estruturas.

É válido ressaltar que, embora os resultados obtidos sejam promissores, é importante realizar validações adicionais do módulo em diferentes condições de solo e geometrias de piezômetros. Estas validações permitirão uma maior robustez do método e uma ampliação de sua aplicabilidade em diversos contextos geotécnicos.

Em suma, o módulo semiautomatizado para teste de equalização em piezômetros demonstrou ser uma ferramenta eficaz e confiável, contribuindo para avanços significativos na área geotécnica. Com suas funcionalidades bem estabelecidas, ele se mostra promissor para ser empregado em estudos e projetos geotécnicos, proporcionando uma melhor compreensão dos fenômenos geotécnicos e hidráulicos e auxiliando na tomada de decisões embasadas em dados precisos e consistentes.

5.5 EXPERIMENTOS EM LABORATÓRIO COM TODO O SISTEMA EM CONJUNTO: TESTES E RESULTADOS

Com o objetivo de validar integralmente a solução SADUMBA desenvolvida, foram realizados testes abrangentes no sistema, visando validar tanto o sistema de aquisição automática de dados, composto pela "Placa Universal", Placa de Condicionamento de Sinais e um piezômetro de corda vibrante 4500C mencionados anteriormente, quanto o sistema de transmissão automática de dados, composto pelos módulos de conexão com servidor MQTT presentes na "Placa Universal", e por fim, o sistema de gerenciamento e processamento, representado pelo Node-RED, responsável por receber as leituras e apresentar os dados.

Com este propósito foi elaborado um gabarito de teste que já foi mencionado brevemente e agora será explicado em detalhes. O gabarito consiste em uma estrutura retangular de madeira com dois tubos de PVC de diâmetro $\frac{3}{4}$ " fixados a ela. Na extremidade inferior de cada tubo foram instaladas válvulas globo para controlar o fluxo de água adicionada pela parte superior dos tubos. A Figura 121 ilustra o gabarito durante o processo de fabricação.

Figura 121 – Confeção do gabarito de testes elaborado para testar a solução desenvolvida



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Adicionalmente foram incluídos duas mangueiras ao gabarito Figura 122. Estas mangueiras são transparentes e foram fixados por meio de joelhos e conexões não rosqueadas na extremidade de cada tubo, criando assim um sistema vaso comunicante, possibilitando a coluna de água que está dentro do tubo de PVC ser acompanhada visualmente, por meio da fita métrica que foi fixada entre as duas mangueiras transparentes, como pode ser visto na Figura 122.

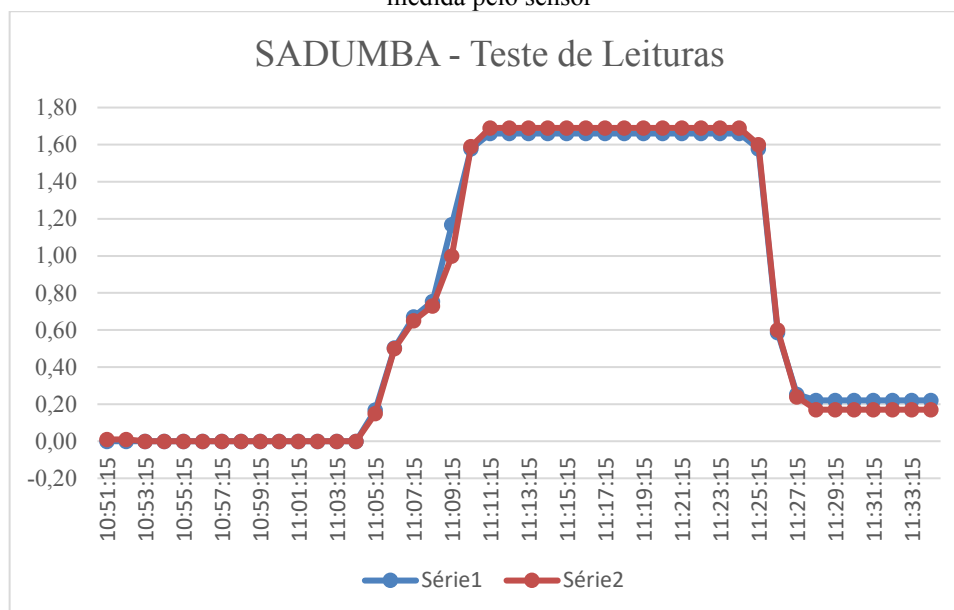
Figura 122 – Vista frontal do gabarito desenvolvido



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para validar integralmente o dispositivo e o sistema desenvolvidos, o Piezômetro de corda vibrante 4500C foi inserido no tubo do gabarito mencionado anteriormente, e um teste de carga e descarga foi realizado, começando com carga zero e chegando a uma carga de aproximadamente 1,68 metros de coluna d'água. O gráfico deste teste pode ser observado na Figura 123 , onde a Série 1 representa os dados coletados manualmente e a Série 2 representa os dados obtidos pelo sistema.

Figura 123 – Gráfico dos dados gerados no teste de leitura utilizando o gabarito de testes para variar a carga medida pelo sensor



Fonte: Elaborado pelo Autor.

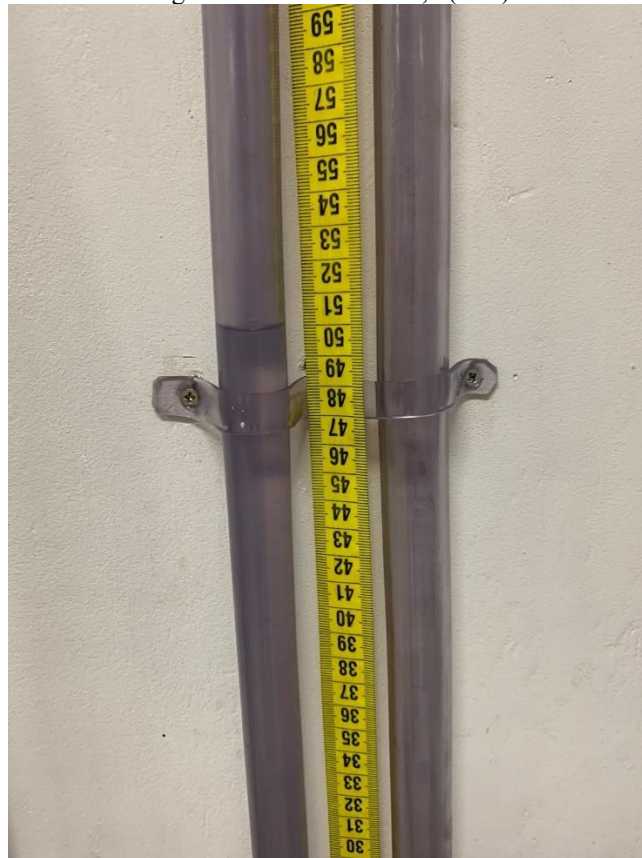
Conforme evidenciado no gráfico, as leituras realizadas pelo dispositivo SADUMBA, ao ler o sensor de corda vibrante, reproduzem de forma precisa as pressões registradas, apresentando alta precisão e acurácia. Nas Figura 124 a Figura 126 são apresentados registros fotográficos da coluna de água estabelecida pelo gabarito, que estão representados no gráfico mencionado anteriormente.

Figura 124 – Leitura 1,68 (mca) Carga para teste



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 125 – Leitura de 0,5 (mca)



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 126 – Leitura 0,22 (mca)

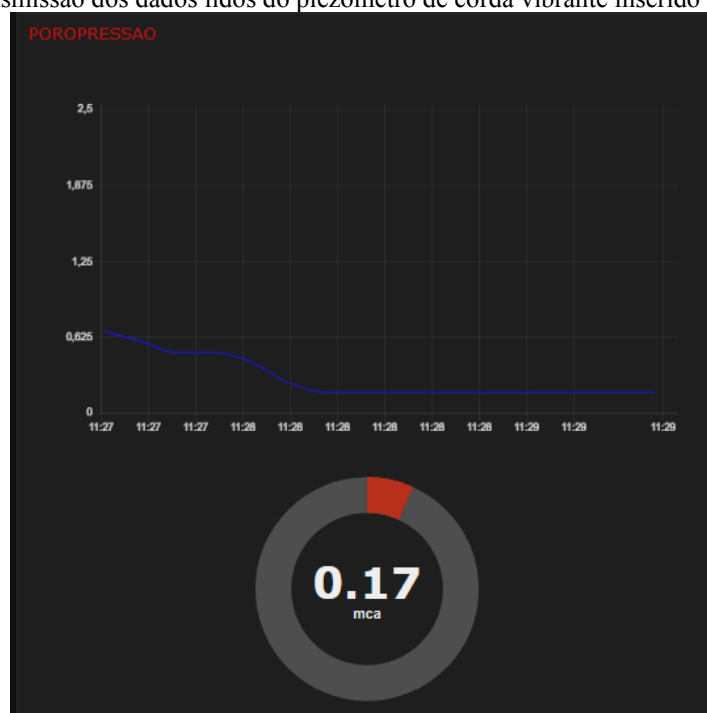


Fonte: Elaborado pelo Autor.

Por fim, nas Figura 127 e Figura 128 são apresentadas as telas do Node-RED que receberam os dados do dispositivo e exibem tanto o histórico de curto prazo quanto a leitura instantânea do dispositivo quando as fotos foram tiradas.

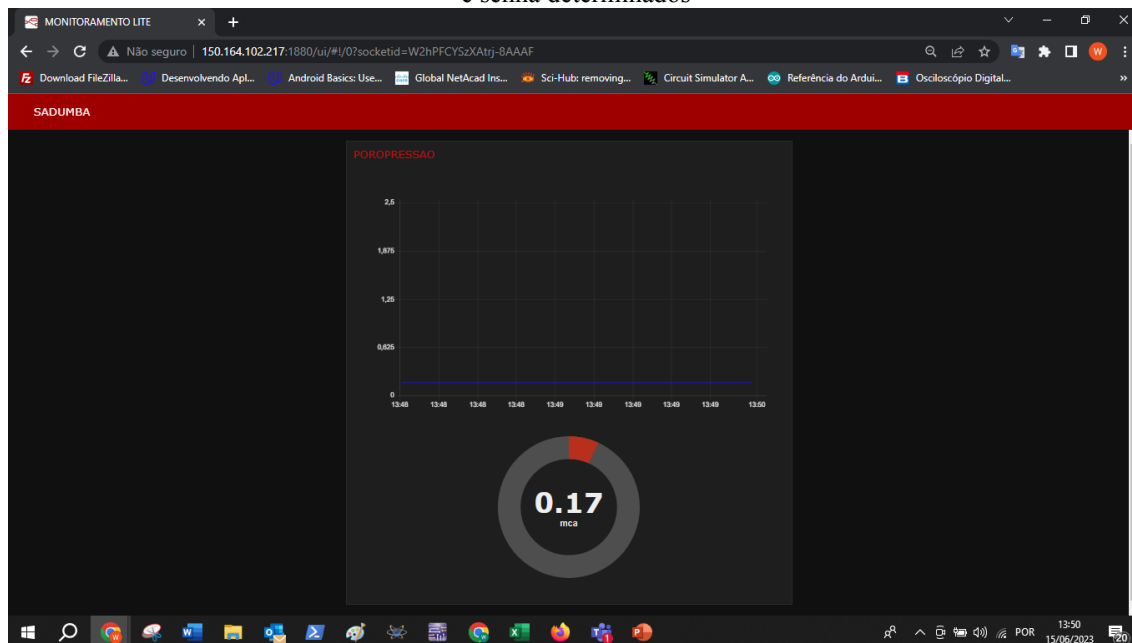
Estes resultados reforçam a eficácia do dispositivo SADUMBA e do sistema implementado, demonstrando sua capacidade de realizar medições precisas e confiáveis, além de possibilitar o monitoramento em tempo real por meio do Node-RED. Estes avanços contribuem para o aprimoramento das técnicas de monitoramento de pressão em piezômetros, permitindo uma maior compreensão dos processos hidrogeológicos e aprimorando o conhecimento em áreas como geotecnia e hidráulica. Além disto, a utilização do gabarito de teste e a comparação entre as leituras manuais e automatizadas evidenciam a confiabilidade do sistema desenvolvido, fornecendo subsídios importantes para sua aplicação em ambientes reais de monitoramento de água subterrânea.

Figura 127 – Gráfico com as variações na fase de descarga utilizando o gabarito de teste e o sistema SADUMBA para leitura e transmissão dos dados lidos do piezômetro de corda vibrante inserido no tubo do gabarito



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 128 – Vista geral da Tela de apresentação dos dados sendo acessada via Web após a autenticação do login e senha determinados



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Deste modo, pode-se comprovar o bom funcionamento do dispositivo SADUMBA, conseguindo reproduzir as leituras com precisão e acurácia. Além disto, o sistema de transmissão automática de dados e o sistema de gestão e processamento também obtiveram comportamentos satisfatórios nos testes realizados.

Através dos experimentos conduzidos foi possível comprovar a eficácia e o bom funcionamento do dispositivo SADUMBA no que diz respeito à eficiência na transmissão de dados das leituras de pressão. Os resultados obtidos demonstraram que o dispositivo é capaz de desempenhar suas funções de forma confiável e consistente.

O sistema de transmissão automática de dados, que engloba os módulos de conexão com servidor MQTT presentes na "Placa Universal", e o sistema de gestão e processamento, baseado no Node-RED, também se mostraram satisfatórios durante os testes realizados. Estes componentes foram capazes de receber, armazenar e apresentar os dados coletados de forma adequada, garantindo a integridade e a acessibilidade das informações.

Estes resultados são de extrema importância para a validação e a aplicação prática do dispositivo SADUMBA em ambientes reais de monitoramento de água subterrânea. A confiabilidade e o desempenho satisfatório do sistema como um todo proporcionam uma base sólida para sua utilização em estudos hidrogeológicos, geotécnicos e de recursos hídricos, contribuindo para o avanço do conhecimento nestas áreas.

Com base nos experimentos e nos resultados obtidos, é possível afirmar que o dispositivo SADUMBA, juntamente com o sistema de transmissão automática de dados e o sistema de gestão e processamento, apresentam um conjunto de funcionalidades efetivas e confiáveis para o monitoramento e a análise de pressões em piezômetros.

No entanto, cabe ressaltar a importância de estudos e testes adicionais para aperfeiçoar ainda mais o dispositivo e o sistema, buscando aprimorar sua robustez, ampliar sua faixa de aplicação e explorar possíveis melhorias nos protocolos de transmissão e processamento de dados. Estas ações visam garantir a continuidade do avanço tecnológico e científico na área de monitoramento de água subterrânea, proporcionando soluções cada vez mais eficientes e precisas para os desafios enfrentados neste campo.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

6.1 CONCLUSÕES

Durante o desenvolvimento dos dispositivos no presente estudo foram conduzidos testes com o objetivo de avaliar o desempenho e a eficácia das soluções propostas. Duas placas foram submetidas a testes gerais no sistema: a "Placa Universal", responsável pela aquisição automática de dados, e a Placa de Condicionamento de Sinais, responsável por preparar os sinais para posterior leitura. Os resultados obtidos confirmaram o adequado funcionamento destas placas, evidenciando sua capacidade de adquirir e processar dados de forma eficiente.

O módulo de teste de equalização em piezômetros do tipo *standpipe* demonstrou efetividade em seus cálculos. Os dados coletados durante o ensaio foram interpolados com base em informações reais do piezômetro genérico, resultando em valores de permeabilidade calculados que se aproximaram consideravelmente dos valores esperados.

No que diz respeito ao sistema de transmissão automática de dados, composto pelos módulos de conexão com o servidor MQTT presentes na "Placa Universal", foi constatado um bom funcionamento. Este sistema foi capaz de transmitir os dados coletados de forma eficiente e confiável, garantindo sua disponibilidade para análise e processamento posterior.

O módulo de teste de dissipação, responsável por realizar cálculos e se comportar durante os ensaios de acordo com sua concepção, também obteve um bom desempenho. Os resultados obtidos confirmaram que este módulo desempenhou satisfatoriamente suas funções, proporcionando medições precisas e confiáveis das pressões registradas.

Com base nos testes realizados e nos resultados obtidos, pode-se concluir que os dispositivos desenvolvidos demonstraram um bom funcionamento e eficiência em suas respectivas funcionalidades. Eles mostraram-se capazes de adquirir, processar, transmitir e analisar dados de pressão de forma precisa e confiável.

Durante o processo de desenvolvimento dos dispositivos, destaca-se a importância da validação em bancada dos circuitos simulados em software. Embora os softwares sejam ferramentas essenciais para a simulação, é fundamental reconhecer que eles não consideram as variáveis ambientais inerentes ao desenvolvimento de dispositivos eletrônicos, o que é relevante para o presente projeto.

Assim, é crucial realizar a validação dos circuitos simulados em bancada, levando em conta as reais condições de operação. Neste sentido, os dispositivos desenvolvidos neste estudo passaram por este processo, incluindo a simulação e validação de cada circuito de forma

separada, seguida pela integração destas etapas. Esta abordagem permitiu a identificação antecipada de problemas e falhas, facilitando a detecção e mitigação destas questões.

Os resultados obtidos demonstraram que os dispositivos funcionaram conforme o esperado. Em determinados testes, eles apresentaram desempenho excelente, superando até mesmo as expectativas para um protótipo que ainda necessita de aprimoramentos e implementações importantes, a fim de explorar todos os recursos disponíveis nas tecnologias especificadas.

No que se refere ao software, destaca-se a importância do controle de versões dos algoritmos desenvolvidos, bem como das versões de simulações e projetos de hardware. Este aspecto é particularmente relevante, porque pode ter um impacto significativo nos projetos. Sem um bom controle de versão do software, todo o conhecimento adquirido e o trabalho realizado, que envolvem horas de estudo em referências importantes, podem ser perdidos ou não documentados e ficar indisponíveis para consulta.

Além disto, no desenvolvimento dos softwares neste estudo, é relevante explorar diversas linguagens de programação em um mesmo projeto. As tecnologias de integração entre linguagens e as capacidades dos hardwares de executarem tarefas simultâneas em núcleos distintos oferecem possibilidades para abordagens simultâneas, sem interromper as tarefas predeterminadas.

Neste estudo, esta abordagem foi aplicada utilizando a linguagem C++, nativa da IDE do Arduino, para programar o firmware do dispositivo desenvolvido e a linguagem C# .NET com recursos do Windows Forms para o desenvolvimento do módulo de teste de dissipação e sua interface.

Apesar dos resultados satisfatórios alcançados, é importante ressaltar a necessidade de estudos e testes adicionais para aprimorar os dispositivos e o sistema como um todo. Recomenda-se melhorias no projeto de hardware, incluindo a implementação de soluções para as áreas identificadas como pontos de melhoria, bem como a exploração de tecnologias e recursos que possam otimizar o desempenho e a funcionalidade dos dispositivos.

Sugere-se a continuidade do trabalho por meio da investigação e validação da aplicabilidade dos dispositivos em diferentes cenários e condições, a fim de avaliar sua robustez e adaptabilidade. É relevante realizar estudos de campo em ambientes reais de monitoramento de água subterrânea, para verificar o desempenho dos dispositivos em situações práticas e coletar dados adicionais que contribuam para a melhoria contínua do sistema.

Por fim, considerando a importância do controle de versões e documentação de software, é recomendado estabelecer práticas e procedimentos adequados para o gerenciamento

de versões e registros de todos os algoritmos e softwares desenvolvidos, garantindo sua rastreabilidade e disponibilidade para referências futuras e desenvolvimentos subsequentes.

Com base nos resultados alcançados e nas propostas de continuidade mencionadas, conclui-se que os dispositivos desenvolvidos, juntamente com os sistemas de transmissão automática de dados e de gestão e processamento, possuem um potencial significativo para contribuir com o monitoramento de pressões em piezômetros e a compreensão dos processos hidrogeológicos. Estas tecnologias podem ser aplicadas em estudos hidrogeológicos, geotécnicos e de recursos hídricos, oferecendo soluções eficientes e confiáveis para o avanço do conhecimento nestas áreas.

Por último, é importante destacar que ao longo do desenvolvimento do trabalho foram solicitadas e obtidas algumas propriedades intelectuais. Neste sentido, foi adquirida a propriedade intelectual de um programa de computador denominado "Modelagem para criação de limites de controle e previsão de dados para instrumentos geotécnicos", elaborado na linguagem Python. E estão em andamento três pedidos adicionais: o registro da invenção como um todo, como modelo de utilidade, o registro dos softwares desenvolvidos, tanto o firmware quanto os dois programas que compõem o módulo de teste de equalização.

6.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE E PESQUISAS FUTURAS

Considerando os resultados obtidos e as necessidades identificadas durante o desenvolvimento dos dispositivos, foram elaboradas propostas de continuidade e pesquisas futuras que visam aprimorar o sistema e expandir suas funcionalidades. Estas propostas são apresentadas a seguir:

1. Integração do módulo de teste de dissipação ao software Node-RED: uma das propostas consiste em integrar o módulo de teste de dissipação ao ambiente de desenvolvimento Node-RED. Esta integração permitiria a criação de uma plataforma única e integrada, onde todos os componentes do sistema estariam interconectados e sincronizados. Desta forma, seria possível obter uma visão abrangente e facilitada das informações coletadas, além de proporcionar maior flexibilidade e escalabilidade ao sistema.
2. Desenvolvimento de um dispositivo para automatizar 100% do teste de equalização em piezômetros do tipo *standpipe*: outra proposta relevante é a criação de um dispositivo específico para automatizar completamente o teste de equalização em piezômetros do tipo *standpipe*. Este projeto de desenvolvimento

buscaria a implementação de soluções tecnológicas que permitissem a realização deste teste de forma mais eficiente, precisa e automatizada. Isto contribuiria para agilizar o processo de equalização e fornecer resultados mais confiáveis e rápidos.

3. Criação da versão 3.0 da Placa de Condicionamento de Sinais: com o objetivo de aprimorar a eficiência e o desempenho do sistema, propõe-se o desenvolvimento da versão 3.0 da Placa de Condicionamento de Sinais. Esta nova versão buscaria ser mais compacta, seguindo padrões industriais e utilizando componentes SMD (Surface Mount Device). Estas melhorias contribuiriam para a redução do tamanho físico dos dispositivos, facilitando sua instalação em espaços limitados, além de proporcionar maior confiabilidade e durabilidade aos componentes.
4. Inclusão de telas de configuração e cadastro de instrumentos no Node-RED: com o intuito de tornar o sistema mais completo e comercializável, sugere-se a inclusão de telas de configuração e possibilidade de cadastramento de instrumentos no ambiente Node-RED. Esta melhoria permitiria uma interface intuitiva e amigável para o usuário, facilitando a configuração e o gerenciamento dos dispositivos. Além disto, abriria a possibilidade de comercialização da solução, incorporando melhorias de mercado e de usabilidade inerentes aos dispositivos IoT.

Estas propostas de continuidade e pesquisas futuras visam modernizar o sistema desenvolvido, tornando-o mais completo, eficiente e adaptado às necessidades dos usuários. A integração do módulo de teste de dissipação ao Node-RED proporcionaria uma plataforma unificada, simplificando o acesso e a análise dos dados. O desenvolvimento de um dispositivo para automatizar totalmente o teste de equalização em piezômetros do tipo *standpipe* traria benefícios significativos em termos de eficiência e precisão. A criação da versão 3.0 da Placa de Condicionamento de Sinais permitiria um aprimoramento

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Johnny Souza Andrade; BALBI, Diego Antônio; MELO, Alexandre Vaz de Melo; BASTOS, Wellerson da Silva. Design of an automatic and remote monitoring system of dams instrumentation: Cemig GT's Experience At Irapé Dam. *In: Dam world*, 2018, Foz Iguaçu, Brasil. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Portaria N° 70.389, de 17 de maio de 2017.** Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei n° 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução n° 95, de 7 de fevereiro de 2022.** Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração.

Arduino. (s.d.). Arduino Mega 2560 Rev3. Arduino Store. Disponível em: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3> Acesso em: 18 jun. 2023.

Arduino. (s.d.). Arduino Uno Rev3. Arduino Store. Disponível em: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3> Acesso em: 15 jun. 2023.

ATZORI, Luigi; IERA, Antonio; MORABITO, Giacomo. The Internet of Things: A Survey. **Computer Networks**, v. 54, n. 15, p. 2787-2805, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.

BASTOS, Wellerson; RAMOS, Marcos de Ávila Pimenta Filho Juliano; CARVALHO, Rodrigo. Projeto de sistema de monitoramento automatizado de instrumentação de barragens: Estudo de caso da barragem da UHE Ilha SOLTEIRA. *In: Seminário Nacional de Grandes Barragens*, 33., 2021, Brasil. **Anais...** Seminário Nacional de Grandes Barragens, 2021.

BAILEY, William W. **Vibrating wire meter**. Depositante: William W. Bailey. US-3889525-A. Concessão: 17 jun. 1975. Disponível em: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/3889525>.

CAMPBELL SCIENTIFIC BRASIL. **VWAnalyzer**. Disponível em: <https://www.campbellsci.com.br/vwanalyzer>. Acesso em: 21 jun. 2023.

CARISSIMI, A. Internet das Coisas: Middlewares e outras coisas. *In: RIGHI, R. R.; PADOIN, E.; SIQUEIRA, M. (Eds.). XVI Escola Regional de Alto Desempenho*. Porto Alegre: SBC-Porto Alegre, 2016. p. 25-50. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/301298394_Internnet_das_Coisas_Middlewares_e_outras_coisas. Acesso em: 07 maio. 2023.

CERQUEIRA, Hélio Márcio Lopes de. **Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas em mineração**. 2017. 166 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Escola de Minas, Universidade Federal Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/8044>.

CERQUEIRA, Hélio; LOPES, Marilene; QUEIROZ, Camila M.; VIEL, Isabella N.; SOARES, Leonardo; SEBASTIÃO, Cristiane S.; & DIAS, Leonardo S. de O. Estudo de acurácia da automatização de piezômetros tipo Casagrande em barragens. *In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica: O Futuro Sustentável do Brasil passa por Minas*, 18. 2016, Belo Horizonte. **Anais...** COBRAMSEG, 2016.

CIEPŁOK, G.; KARWOWSKI, W.; BEDNARSKI, Ł. Influence of Cable Length on The Vibrating Wire - Sensors Dynamic Measurements. **Archives of Civil Engineering**, v. 64, n. 4, p. 65-76, 2018. DOI: 10.2478/ace-2018-0063.

CIEPŁOK, G.; KOZIOL, P.; SZCZEPANIK, M.; UHL, T. Vibrating wire strain gauges in geotechnical monitoring of railway structures. **Procedia Engineering**, n. 189, p. 87-94, 2018.

CISCO NETWORKING ACADEMY. Conectando coisas IoT [Curso on-line]. **Netacad**, 2020. Disponível em: <https://www.netacad.com/pt-br/courses/iot>.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. Auscultação e Instrumentação de barragens no Brasil. *In: Simpósio sobre Instrumentação de barragens*, 2., 1996. **Anais...**, 1996.

CUNHA, A. B.; GONTIJO, A. F.; BRAGA, A. R.; ARAUJO FILHO, J. E. M.; LIMA, D. P.; BRANDAO, D. A. L.; MACIEL, P. H. A.; PINTO, V. M. M.; MELO, A. V.; CALIMAN, E. H.; ANDRADE, J. S. Resultados da Primeira Rede de Sensores de Auscultação de Barragens Sem Fio, Autônoma e de Baixo Custo da Cemig GT. *In: Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*, 9., 2017, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, Citenel, 2017 (v. 9).

DENG, Tieliu; YU, Feng; HU, Jianming; LUAN, Zhaoqun; MA, Junting. Some New Developments of Self-excitation Vibrating-wire Sensor Technology. **Proceedings of SPIE**, v. 4414, p. 226, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.440195>.

DUNNICLIFF, John. Geotechnical instrumentation for monitoring field performance. **Wiley-IEEE**, p. 216–219, 1993.

Eletrogate. (s.d.). **Módulo WiFi ESP32** Bluetooth 30 pinos. Eletrogate. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/modulo-wifi-esp32-bluetooth-30-pinos> Acesso em: 18 jun. 2023.

Eletrogate. (s.d.). **Módulo WiFi ESP8266** NodeMCU V3 (LoLin). Eletrogate. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/modulo-wifi-esp8266-nodemcu-v3-lolin> Acesso em: 18 jun. 2023.

Eletrogate. (s.d.). **Módulo Conversor Corrente para Tensão XY10**. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/modulo-conversor-corrente-para-tensao-xy10> Acesso em: 18 jun. 2023.

Eletrogate. (s.d.). **Placa de Desenvolvimento STM32F030C8T6 ARM STM32**. Eletrogate. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/placa-de-desenvolvimento-stm32f030c8t6-arm-stm32> Acesso em: 18 jun. 2023.

FANTINATTI, Patrícia Helena Azevedo; FANTINATTI NETO, Franchel Pereira; TIBANA, Sérgio; ALMEIDA, Frederico Terra de. **Ensaio de Permeabilidade In Situ em Solos Saturados**. Manual de Sondagens. 5. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia e Engenharia, 2013.

FONSECA, Alessandra da Rocha. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica – estudo de caso das barragens da UHE São Simão**. 2003. 158 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

FU, Qiang; Bing, Han. Bridge Vibration Monitoring System Based on Vibrating-Wire Sensor and ZigBee Technologies. *In: IEEE International Conference on Communication Software and Networks*, 9., 2017, Guangzhou, China. **Anais... ICCSN**, Guangzhou, 2017. p. 338-342. DOI: 10.1109/ICCSN.2017.8230131.

GEOKON. **Piezômetro modelo 4500C**: Manual Geokon. Disponível em: <https://www.geokon.com/content/manuals/4500/index.html#t=topics%2Fcover.htm>.

GEOKON Inc. Instruction Manual. **Model 4500 series Vibrating Wire Piezometer**, 26p, 2014.

GUERRERO, Porfirio V.; VICENTE, H. K. M.; GORTARI, Agustín de. Comparison of Excitement Methods of Vibrant Wire Sensors. **African Journal of Physics**, v. 3, n. 4, p. 078-080, 2016.

HE, Hu; SUN, Jian Hui; TIAN, Dong Cheng; LI, Na. Optimization design of excitation strategy on vibrating wire sensor. **Applied Mechanics and Materials**, v. 128-129, p. 1186-1190, 2012. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.128-129.1186.

Hu, J., Qu, L., Lu, Z., & Chen, G. (2021). A system of vibrating wire displacement sensor data acquisition designed based on the NB-IoT. In **33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)** (pp. 1-6). IEEE. DOI: 10.1109/CCDC52312.2021.9601789

HVORSLEV, M. Juul. Time lag and soil permeability in ground-water observations. **Bull. No. 36, Waterways Experiment Station**. Mississippi, USA: Corps of Engineers, U.S. Army, 1951.

INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS. Automated Dam Monitoring systems, **Bulletin 118**, 2000.

INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS. **Bulletin 118**: Guidelines for the Design of Dam Instrumentation. International Commission on Large Dams, 2000.

KAMP, Garth van der. Methods for determining the in situ hydraulic conductivity of shallow aquitards – an overview. **Hydrogeology Journal**, 2001.

KIM, Jung Yeol; YOO, Hyun Suk; KWON, Soon Wook; CHO, Moon Young. Development of wireless module for tunnel vibrating wire type sensor. *In: International Symposium on*

Automation & Robotics in Construction, 24., 2007. **Anais...** Construction Automation Group, I.I.T. Madras, 2007.

KOVACS, Istvan; MIRCEA, Maria; GYURA, Bela. Analog to Digital Front-End Board ADVW, for Vibrating Wire Sensor Nodes, Used in Hydrotechnical Structures Monitoring Sensor Networks. *In: 2014 IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, 8., 2014. Anais...* SACI, 2014. p. 475-480. DOI: 10.1109/AQTR.2014.6857885 .

LABCENTER ELECTRONICS. **Proteus 8**. Witney, Oxfordshire: Labcenter Electronics, 2017.

LABORATÓRIO de Engenharia Civil. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil.

LAMPROPOULOS, Georgios; SIAKAS, Kerstin V.; ANASTASIADIS, Theofylaktos. Internet of Things in the Context of Industry 4.0: An Overview. **International Journal of Engineering Knowledge**, v. 1, n. 1, p. 1-11, 2019. DOI: 10.2478/IJEK-2019-0001.

LEE, H. M.; KIM, J. M.; SHO, K.; PARK, H. S. A wireless vibrating wire sensor node for continuous structural health monitoring. **Smart Materials and Structures**, v. 19, n. 5, 055004, 2010. DOI:10.1088/0964-1726/19/5/055004.

LIN, Jie; YU, Wei; ZHANG, Nan; YANG, Xinyu; ZHANG, Hanlin; ZHAO, Wei. A Survey on Internet of Things: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy, and Applications. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 4, n. 5, p. 1125-1142, 2017. DOI: 10.1109/JIOT.2017.2683200.

Mercado Livre. (s.d.). **Conversor DC-DC Tensão Negativa 12V** Módulo Step-up Down. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1003193461-conversor-dc-dc-tenso-negativa-12v-modulo-step-up-down-_JM Acesso em: 18 jun. 2023.

MAO, Suo Ying; ZHAO, Jun Hua; ZHOU, Fang Fang. Improvement and Design of Single Coil Vibrating-wire Sensor Signal Acquisition System Based on STM32. **Applied Mechanics and Materials**, v. 511-512, p. 764-769, 2014. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.511-512.764.

MEI, C. Design of circuitry for vibrating wire strain gauge. *In: Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics, 11., 2015. Anais...* IEEE, 2015. p. 97-100.

MEIRELES, Leonardo Vidigal. **Projeto de uma rede de internet das coisas para monitoramento e alerta de emergência em áreas de risco**. 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

Mishra, P. K., Pratika, Kumar, M., Kumar, S., & Mandal, P. K. (2017). Wireless real-time sensing platform using vibrating wire-based geotechnical sensor for underground coal mines. **Sensors and Actuators A: Physical**, 267, 96-103. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.11.036>

MOSQUITTO. Disponível em: <https://mosquitto.org/>.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Multisim 14**. Austin, TX: National Instruments, 2016.

NODE-RED. Disponível em: <https://nodered.org/>.

PENIDO, Henrique de Andrade; RIBEIRO, Artur Bastos; MENDES, Mardon Borges; SOUZA, Deni Otávio; CERQUEIRA, Hélio. Experiências práticas na automatização de barragens na Vale S.A. *In: Geotecnia Aplicada à Mineração - GEOMIN*, Ouro Preto, 2017.

POP, Septimiu; CIASCAI, Ioan; BANDE, Vlad; PITICA, Dan. High Accuracy Method for Measurement of Vibrating Wire Transducer. *In: International Spring Seminar on Electronics Technology*, 36., 2013, Romania. **Anais... ISSE**, 2013. DOI: 10.1109/ISSE.2013.6648273.

RODRIGUEZ, M.; GUPTA, R. Modeling and Analysis of Vibrating Wire Transducers for Signal Conditioning Applications. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 15, n. 3, p. 300-315, 2020.

SANG, Yong; ZHANG, Zengren. Study on Fast Frequency-sweep Method for Vibrating Wire Sensor. *In: 2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications*, 2020, Dalian, China. **Anais...** Dalian: School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, 2020a. p. 1-5. DOI: 10.1109/ICAICA50119.2020.00007.

SANG, Yong; ZHANG, Zengren. Driving Circuit Design of Vibrating Wire Sensor Based on Frequency Sweep Mode. *In: 2020 IEEE International Conference on Electronics Technology*, 3., 2020, Chengdu, China. **Anais... IEEE**, 2020b. Doi: 10.1109/ICET49756.2020.9258779.

SATTLER, K.; ELWOOD, D.; BERSCHIED, B.; HENDRY, M.T.; HAJI ABDULRAZAGH, P.; HUNTLEY, D.; WICKERT, A.D. Field application of inexpensive custom-built programmable dataloggers for routine instrumentation needs. **Bulletin of the Ecological Society of America**, v. 95, n. 2, p. 166-176, 2020.

SILVEIRA, João Francisco A. **Instrumentação e Segurança de Barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

SILVEIRA, João Francisco Alves. Lições aprendidas com a automação da instrumentação de barragens no Brasil. *In: Seminário Nacional de Grandes Barragens*, 29., 2013, Porto de Galinhas. **Anais...** SNGB: Porto de Galinhas, 2013.

SILVEIRA, R. M. **Instrumentação geotécnica em barragens**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2006.

SONI, A.; MAKWANA, P. A Comparative Study on Signal Conditioning Techniques for Vibrating Wire Sensors. **Journal of Electrical Engineering**, v. 5, n. 2, p. 100-115, 2017.

SONI, Dipa; MAKWANA, Ashwin. A survey on mqtt: a protocol of internet of things (iot). *In: International conference on telecommunication, power analysis and computing techniques*, 2017, Chennai, India. **Anais...** ICTPACT, Bharath Institute of Higher Education and Research, 2017. (v. 20, p. 173-177).

TEXAS INSTRUMENTS. Filter design tool. Disponível em: <https://www.ti.com/design-resources/design-tools-simulation/filter-designer.html>.

THOMPSON, J.; CHEN, L. Characteristics of Vibrating Wire Sensors for Signal Conditioning in Structural Health Monitoring. **Sensors**, v. 10, n. 4, p. 200-215, 2019.

VERMA, Anurag; PRAKASH, Surya; SRIVASTAVA, Vishal; KUMAR, Anuj; MUKHOPADHYAY, Subhas Chandra. Sensing, Controlling, and IoT Infrastructure in Smart Building: A Review. **IEEE Sensors Journal**, v. 19, n. 19, p. 8267-8286, 2019. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2922409.

VIMAN, Liviu; LUNGU, Serban. **Electrical Model for Two Coils Vibrating Wire Transducers without Mutual Couplings**. 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/251972755>.

VIMAN, Liviu; CIASCAL, Ioan; DABACAN, Mircea; POP, Septimiu. Using an embedded microcontroller system to excite vibrating wire transducers. *In: International Spring Seminar on Electronics Technology*, 27., 2004, Bankya, Bulgaria. **Anais... IEEE**, 2004. (v. 1, p. 1-4). doi: 10.1109/EST.2004.1308762.

WANG, Tao; ZHOU, Wenqian. A study on dynamic measurement methods based on vibrating wire sensors. **Measurement Science and Technology**, v. 30, n. 2, 2018. DOI: 10.1088/1361-6501/aaf8ff.

WU, Zhenyu; LIU, Shenglan; DU, Meng; LI, Qiang; HAN, Chengda; WU, Jiping. Design of Vibrating Wire Sensor Signal Acquisition Board based on STM32. *In: World Congress on Intelligent Control and Automation*, 12., 2016, Guilin, China. **Anais...** Guilin: IEEE, 2016. (p. 1-6). DOI: 10.1109/WCICA.2016.7578666

YU, Feng; GUPTA, Naren. An efficient model for improving performance of vibrating-wire instruments. **Measurement**, v. 37, n. 4, p. 327-337, 2005. DOI: 10.1016/j.measurement.2004.12.003.

ZHANG, S.; WANG, Q. Design and Simulation of Signal Conditioning Circuitry for Vibrating Wire Sensors. **International Journal of Electronics and Communications**, v. 7, n. 1, p. 50-65, 2018.

ZHU, Hui-Ling; ZHU, Xin-Yin. The High Precision Vibration Signal Data Acquisition System Based on The STM32. **Sensors & Transducers**, v. 172, n. 6, p. 98-104, 2014.